



Ana Teresa Pacheco Barra

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE ARGAMASSAS NÃO ESTRUTURAIS COM AGREGADOS FINOS RECICLADOS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Fernando Farinha da Silva Pinho, Prof. Doutor, Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: Válter José da Guia Lúcio, Prof. Doutor, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Arguente: Prof.^a Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Vogal: Prof. Doutor Válter José da Guia Lúcio



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2011

“Copyright” Ana Teresa Pacheco Barra, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus avôs, que, mesmo ausentes, estiveram sempre presentes.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu agradecimento a todos aqueles contribuíram, directa ou indirectamente, para o desenvolvimento deste trabalho, em particular:

Ao Professor Fernando Pinho, Orientador científico desta dissertação, e ao Professor Válder Lúcio, Co-orientador científico, pelo apoio, incentivo e interesse manifestado pelo presente trabalho, bem como pela disponibilidade demonstrada e por todos os ensinamentos transmitidos.

À empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, em especial ao Eng. Rui Barros, pelo fornecimento do agregado fino reciclado, pela disponibilização de algum material bibliográfico e pelo esclarecimento de algumas dúvidas.

Ao Eng. Victor Vermelhudo da empresa SECIL – Outão, pelo fornecimento do agregado fino normalizado.

Ao Eng. Brazão Farinha, pela disponibilização das pastilhas quadradas utilizadas na campanha experimental do presente trabalho.

À Professora Paulina Faria, pela colaboração na obtenção de material bibliográfico bem como pela disponibilidade demonstrada no esclarecimento de algumas dúvidas.

Ao Sr. Jorge Silvério e ao Sr. José Gaspar, do DEC – FCT/UNL, pelo auxílio na preparação e realização de alguns ensaios da campanha experimental da presente dissertação.

À D. Maria da Luz e à D. Carla Figueiredo, do DEC – FCT/UNL, pela enorme simpatia, paciência e disponibilidade demonstradas.

A todos os meus colegas, em particular à Carolina Barreto e ao André Almeida, pela ajuda na realização de alguns ensaios.

Ao Gonçalo, pelo incentivo constante e enorme paciência.

Aos meus pais, irmã e restante família pelo apoio incondicional e incentivo durante a realização deste trabalho, bem como durante todo o meu percurso académico.

Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados

RESUMO

O tema tratado na presente dissertação, desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (DEC – FCT/UNL), pretende estudar o comportamento físico e mecânico de argamassas com agregados finos reciclados, provenientes de resíduos de construção e demolição (RCD).

Para tal, numa primeira fase, faz-se uma abordagem geral do tema e análise de outros trabalhos de investigação nesta área, recorrendo para o efeito a uma pesquisa bibliográfica. Esta pesquisa incidirá sobre a reutilização de agregados na produção de argamassas e na caracterização física e mecânica de argamassas de cimento e cal aérea.

Na segunda parte do estudo, de carácter experimental, faz-se uma caracterização dos agregados finos reciclados e de duas argamassas com os mesmos agregados, ao traço 1:4 (ligante:agregado). Uma das argamassas tem como ligante a cal aérea e outra o cimento. As propriedades obtidas foram comparadas com outras duas argamassas homólogas, ao mesmo traço, mas com agregados finos normalizados.

Os resultados obtidos são apresentados, analisados e comparados com os resultados obtidos por outros autores.

O estudo tem como motivação a necessidade de compreender, do ponto de vista experimental, a viabilidade de reutilização dos RCD no processo construtivo, nomeadamente em argamassas cuja aplicação não obrigue a exigências estruturais, permitindo, deste modo, reduzir os impactes ambientais adjacentes à própria actividade de construção.

Este trabalho enquadra-se na perspectiva de um futuro protocolo a realizar entre uma empresa de recolha e tratamento de RCD e a FCT/UNL, visando otimizar a reutilização e aplicação proveitosa após o processamento e triagem dos RCD.

Palavras-chave: Resíduos de construção e demolição (RCD); Agregados finos reciclados; Argamassa.

Physical and mechanical characterization of nonstructural mortars
with recycled fine aggregates

ABSTRACT

This theme, developed in the Department of Civil Engineering of FCT/UNL, aims to deepen the knowledge concerning the physical and mechanical behavior of mortar with fine aggregate recycled from construction and demolition waste.

A general approach to the subject and analysis of other research in this field was done through literature research. This research focused on the reuse of aggregates in the production of mortars and the physical and mechanical characteristics of mortar cement and lime.

The second part of the study has an experimental nature. A preliminary analysis of fine recycled aggregates were studied along with the physical and mechanical characteristics of mortars with the same two clusters, with the mark 1:4 (binder:aggregate). One of the mortars has lime as binder and the other one has cement. The properties obtained are compared with other approved mortars (with the same mark), but with standard fine aggregate. The results are presented, analyzed and compared with results obtained by other authors

This study is motivated by the need to understand, on the experimental point of view, the feasibility of the reuse of RCD in the construction process, especially in mortars whose applications don't need any structural requirements, allowing the reduction of the environmental impacts caused by the construction activity.

This work promotes the prospect of a future protocol between an enterprise that collects and processes the recycled aggregates and the FCT/UNL, in order to optimize re-use and useful application after processing and sorting the aggregates.

Keywords: Construction and demolition waste; recycled fine aggregates; mortar.

ÍNDICE DE MATÉRIAS

Capítulo I - INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais	1
1.2 – Objectivos e metodologia da dissertação	2
1.3 – Organização da dissertação	3

Capítulo II - ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TEMA

2.1 – Considerações iniciais	5
2.2 – A sustentabilidade da actividade de construção	5
2.2.1 – Abordagem económica da utilização de resíduos de construção e demolição no sector da construção.....	8
2.3 – Resíduos de construção e demolição	9
2.3.1 – Classificação dos resíduos	13
2.3.2 – Aplicabilidade dos RCD na construção.....	15

Capítulo III - TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

3.1 – Considerações iniciais	17
3.2 – Argamassas de cimento	17
3.2.1 – Trabalhos experimentais.....	18
3.3 – Argamassas de cal aérea	27
3.3.1 – Trabalhos experimentais.....	27
3.4 – Síntese de resultados	34
3.5 – Propriedades físicas dos agregados finos reciclados	37
3.5.1 – Granulometria.....	37
3.5.2 – Baridade	37
3.5.3 – Absorção de água	38

Capítulo IV - TRABALHO EXPERIMENTAL

4.2 – Obtenção dos agregados finos reciclados	39
4.2.1 – Breve caracterização da empresa que forneceu os agregados finos reciclados	39
4.2.1 – Breve descrição do processo	40
4.3 – Materiais utilizados na preparação das argamassas.....	43
4.3.1 – Agregados.....	44
4.3.2 – Ligantes	45
4.3.5 – Água	46

4.4 – Ensaio de caracterização física dos constituintes das argamassas	47
4.4.1 – Análise granulométrica dos agregados	47
4.4.2 – Determinação da baridade dos agregados e ligantes	50
4.5 – Preparação dos provetes de argamassa (amassadura).....	52
4.6 – Ensaio às argamassas no seu estado fresco e condições de cura.....	55
4.6.1 – Consistência por espalhamento	55
4.7 – Ensaio de caracterização das argamassas endurecidas	58
4.7.1 – Módulo de elasticidade dinâmico	59
4.7.2 – Resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão.....	61
4.7.4 – Aderência ao suporte	64
4.7.5 – Absorção de água por capilaridade.....	68
4.7.6 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta.....	72
 Capítulo V - ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	
5.1 – Considerações iniciais	77
5.2 – Análise e discussão de resultados.....	77
5.2.1 – Caracterização física dos agregados	78
5.2.2 – Caracterização da argamassa em pasta.....	79
5.2.3 – Caracterização da argamassa endurecida	80
 Capítulo VI - CONCLUSÕES	
6.1 – Considerações Iniciais	85
6.2 – Conclusões e comentários finais	85
6.3 – Objectivos propostos e alcançados	86
6.4 – Desenvolvimentos futuros	87
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
 Anexo I - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARCATERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA.....	95
 Anexo II - FICHA TÉCNICA DO AGREGADO FINO RECICLADO	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Acidente (queda) da ponte em Entre-Os-Rios em 2001.....	1
Figura 2.1 – Depósitos ilegais de resíduos de construção e demolição.....	5
Figura 2.2 – Principais causas do aquecimento global.....	6
Figura 2.3 – Estimativas e projecções do crescimento da população mundial, de 1804 a 2100	7
Figura 2.4 – Pegada ecológica respeitante a Portugal, de 1960 a 2005	7
Figura 2.5 – Contaminação ambiental provocada pela deposição ilegal de RCD.....	11
Figura 2.6 – Processo de demolição selectiva	12
Figura 2.7 – Processo de tratamento dos RCD	12
Figura 2.8 – Valores médios da principal composição dos RCD	14
Figura 3.1 – Processo de obtenção dos agregados finos reciclados produzidos por C. Neno (2010).	21
Figura 3.2 – Provetes em ambiente de cura estudados por C. Bavaresco (2001)	26
Figura 3.3 – Provetes desmoldados em ambiente de cura estudados por V. Rato (2006)	30
Figura 3.4 – Construção dos modelos experimentais estudados por F. Pinho.....	31
Figura 3.5 – Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas de assentamento.....	31
Figura 3.6 – Provetes de 16cm×4cm×4cm estudados por C. Barreto (2010)	33
Figura 4.1 – Vista geral das instalações da empresa SGR.....	40
Figura 4.2 – Equipamento para recolha e transporte de resíduos.....	40
Figura 4.3 – Zona de pré- triagem dos RCD.....	41
Figura 4.4 – Esquematização do processo de triagem dos RCD.....	42
Figura 4.5 – Processo de triagem dos RCD	42
Figura 4.6 – Agregado fino normalizado.....	44
Figura 4.7 – Local de recolha do agregado fino reciclado.....	44
Figura 4.8 – ligantes utilizados na preparação das argamassas.....	46
Figura 4.9 – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da análise granulométrica.....	49
Figura 4.10 – Curvas granulométricas do agregado fino reciclado e do agregado fino normalizado	49
Figura 4.11 – Ensaio de determinação da baridade.....	51
Figura 4.12 – Baridade dos agregados utilizados na preparação das argamassas.....	52
Figura 4.13 – Baridade dos ligantes utilizados na preparação das argamassas.....	52
Figura 4.14 – Moldes utilizados para execução dos provetes de argamassas.....	53
Figura 4.15 – Preparação das argamassas em pasta.....	54
Figura 4.16 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no seu estado fresco.....	56
Figura 4.17 – Moldagem e compactação mecânica dos provetes de 16cm x4cmx4cm.....	57
Figura 4.18 – Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura.....	58
Figura 4.19 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.....	59

Figura 4.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico.....	60
Figura 4.21 – Ensaio de determinação da resistência mecânica.....	62
Figura 4.22 – Resultados médios das resistências mecânicas (28 dias)	63
Figura 4.23 – Resultados médios das resistências mecânicas (90 dias)	63
Figura 4.24 – Ensaio de aderência ao suporte.....	65
Figura 4.25 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte (28 dias)	66
Figura 4.26 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte (90 dias)	67
Figura 4.27 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	69
Figura 4.28 – Resultados médios da absorção de água por capilaridade.....	70
Figura 4.29 – Resultados médios da absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio.....	70
Figura 4.30 – Resultados médios do coeficiente de absorção de água.....	71
Figura 4.31 – Resultados médios do valor assintótico.....	71
Figura 4.32 – Ensaio de determinação da massa volúmica.....	73
Figura 4.33 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente.....	74
Figura 4.34 – Valores médios de porosidade aberta.....	74
Figura 5.1 – Resultados do ensaio de baridade.....	78
Figura 5.2 – Resultados do ensaio de espalhamento.....	79
Figura 5.3 – Resultados do ensaio de amassa volúmica aparente.....	80
Figura 5.4 – Resultados do ensaio de porosidade aberta.....	81
Figura 5.5 – Resultados do ensaio no coeficiente de absorção de água por capilaridade.....	82
Figura 5.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico.....	82
Figura 5.7 – Resultados do ensaio de determinação das resistências à tracção por flexão e à compressão.....	83
Figura 5.8 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria n.º 209/2004.....	9
Tabela 2.2 – Resíduos gerados, em Portugal, por actividade económica: adaptado de “Resíduos gerados em Portugal, 2004-2009”, dados declarados pelo INE.....	10
Tabela 2.3 – Tipo de resíduos e a sua percentagem no espaço comunitário.....	13
Tabela 3.1 – Trabalhos experimentais de referência (argamassas de cimento e RCD)	18
Tabela 3.2 – Composição das argamassas produzidas por M. Braga experimental.....	19
Tabela 3.3 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por M. Braga.	19
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por M. Braga....	20
Tabela 3.5 – Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por M. Braga	20
Tabela 3.6 – Composição das argamassas produzidas por C. Neno.....	21
Tabela 3.7 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Neno	21
Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por C. Neno.....	22
Tabela 3.9 – Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por C. Neno...	22
Tabela 3.10 – Composição das argamassas produzidas por S. Levy e H. Paulo	23
Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas, S. Levy e H. Paulo.....	23
Tabela 3.12 – Composição das argamassas estudadas por L. Miranda	24
Tabela 3.13 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estudados por L. Miranda.	24
Tabela 3.14 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por L. Miranda	25
Tabela 3.15 – Composição das argamassas produzidas por C. Bavaresco	25
Tabela 3.16 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estudados por C. Bavaresco....	26
Tabela 3.17 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por C. Bavaresco	26
Tabela 3.18 – Trabalhos experimentais de referência (argamassas de cal aérea)	27
Tabela 3.19 – Baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria.....	28
Tabela 3.20 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por P. Faria.	28
Tabela 3.21 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de substituição estudadas por P. Faria e F. Henriques	29
Tabela 3.22 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por V. Rato.....	30
Tabela 3.23 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por F. Pinho.....	32
Tabela 3.24 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Barreto	32
Tabela 3.25 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por C. Barreto.....	33
Tabela 3.26 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de substituição estudadas por M. Veiga <i>et al.</i>	34
Tabela 3.27 – Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa de cal aérea	35

Tabela 3.28 – Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa de cimento.....	36
Tabela 4.1 – Processo de valorização dos RCD.....	43
Tabela 4.2 – Características físicas dos agregados.....	50
Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de consistência por espalhamento.....	56
Tabela 4.4 – Características estudadas nas argamassas endurecidas.....	58
Tabela 4.5 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte (28 dias)	66
Tabela 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte (90 dias)	67
Tabela 5.1 – Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa da presente dissertação.....	78

SIMBOLOGIA

SIGLAS

AFN – Agregado fino normalizado
AFR – Agregado fino reciclado
APA – Agência Portuguesa do Ambiente
ASTM – American Society for Testing and Materials
DEC – Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL
FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL
INE – Instituto Nacional de Estatísticas
LER – Lista Europeia de Resíduos
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NCa – provete de argamassa de cal aérea e agregado normalizado
NCi – provete de argamassa de cimento e agregado normalizado
RCa – provete de argamassa de cal aérea e agregado reciclado
RCD – resíduos de construção e demolição
RCi – provete de argamassa de cimento e agregado reciclado
SGR – Sociedade Gestora de Resíduos, SA
UNL – Universidade Nova de Lisboa

NOTAÇÕES ESCALARES LATINAS

A – área
 A_{\square} – área da pastilha quadrada
 A_{\circ} – área da pastilha circular
 a/l – relação água/ligante
b – lado da secção quadrada do provete
Ba – baridade
C – compacidade
Cac – coeficiente de absorção de água por capilaridade
D – máxima dimensão do agregado
DP – desvio padrão
d – mínima dimensão do agregado; média dos quatro valores medidos ou dia
 E_{din} – módulo de elasticidade dinâmico
Esp – espalhamento

F – força de rotura
F_c – força de rotura à compressão
F_f – força de rotura à flexão
f₀ – frequência de ressonância longitudinal
g – aceleração da gravidade
h – lado da secção quadrada do provete ou hora
Hr – humidade relativa
I – momento de inércia
L – comprimento do provete
l – distância entre apoios do suporte do provete
M – massa do recipiente preenchido com o material
M₀ – massa do provete seco
M₁ – massa dos provetes imersos
M₂ – massa dos provetes saturados
M_i – massa do provete no instante *i*
M_t – quantidade de água absorvida até o instante *t*
min – minuto
MVA – massa volúmica aparente
MVR – massa volúmica real
P – porosidade
PA – porosidade aberta
ppm – partes por milhão
R_c – resistência à compressão
R_t – resistência à tracção por flexão
S – área da pastilha circular ou área da face em contacto com a água
T – temperatura
t – tempo
V – volume do recipiente
VA – valor assintótico

NOTAÇÕES ESCALARES GREGAS

ρ – massa volúmica
σ_a – tensão de aderência associada a cada pastilha
σ'_a – tensão de aderência associada a pastilha quadrada

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

A indústria de construção é responsável por 30% das emissões de carbono, consumindo a nível mundial mais recursos naturais que outra actividade económica (Torgal, et al., 2010).

Um caso limite representativo do desequilíbrio da utilização de recursos naturais, nomeadamente das areias, foi o da queda da ponte Hintze Ribeiro em Entre-os-Rios em 2001, figura 1.1. À parte de outros factores, admite-se que a extracção excessiva de areias do rio Douro foi uma das possíveis causas para o desabamento da ponte.



Figura 1.1 – Acidente (queda) da ponte em Entre-os-Rios em 2001 [51]

O acidente de Entre-os-Rios é, portanto, bem elucidativo da importância de garantir o equilíbrio ecológico. O termo “*Ecologia*” foi usado pela primeira vez por Haeckel em 1869, para designar o estudo das relações de um ser com o meio que o rodeia. Esta relação vem-se desenvolvendo ao longo da História, na medida em que, houve desde sempre, por parte do Homem, a necessidade de conhecer o ambiente e os seres com quem partilha o Planeta. A capacidade de produzir impactes no ambiente geológico é uma característica intrínseca da humanidade desde os primórdios (Costa, 2008).

O Homem, pela magnitude dos seus impactes, representa uma constante ameaça na alteração do meio ambiente. Os efeitos da actividade humana no meio representam uma relação directamente

proporcional ao crescimento económico, onde o bem-estar prevalece sobre os prejuízos ambientais implícitos nesse mesmo crescimento.

Um outro aspecto bastante problemático é o da produção de resíduos de construção e demolição, RCD, associado, entre outros factores, ao crescimento da construção civil.

Com vista a minorar os impactes negativos provocados pelos RCD gerados é necessário não só proceder à sua prevenção mas também promover a sua reutilização, em alternativa à deposição em aterro (Algarvio, 2005).

No entanto, e em particular no sector da construção civil, tem existido um esforço para que a possibilidade de reutilização dos resíduos provenientes da construção civil se torne numa realidade, em parte devido à consciencialização dos padrões ambientais impostos pela opinião pública em geral. Grande parte dos resíduos produzidos, desde que correctamente geridos, podem ter um destino que os valorize de forma sustentável, nomeadamente através da sua reutilização em base e sub-base de pavimentos, na produção de betões pobres sem fins estruturais, na produção de blocos de betão, na utilização em projectos de drenagem, entre outros (Gonçalves, 2007). Todavia, a incorporação de agregados finos reciclados em argamassas é ainda uma solução com reduzida concordância no sector da reciclagem.

A produção de argamassas implica impactes ambientais ao nível da extracção de areias. Neste sentido surgiu a necessidade de avaliar o desempenho da produção de argamassas com agregados finos reciclados, de modo a minimizar e ao mesmo tempo reaproveitar os RCD gerados. Contudo, quando se trabalha com agregados reciclados, surgem numerosas variáveis que não seriam contabilizadas no caso do uso de agregados naturais, sendo por isso imprescindível existir um estudo comparativo com uma argamassa convencional.

A presente dissertação, com o tema “Caracterização física e mecânica de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados”, irá desenvolver uma análise comparativa entre uma argamassa com agregados finos reciclados e uma argamassa com agregados finos normalizados, como contributo ao estudo e desenvolvimento da reutilização de agregados finos reciclados em argamassas.

1.2 – Objectivos e metodologia da dissertação

A presente dissertação, desenvolvida no âmbito do mestrado integrado em Engenharia Civil enquadra-se na perspectiva de um futuro protocolo a realizar entre uma empresa de recolha e tratamento de RCD – Sociedade Gestora de Resíduos, S.A.¹⁾ – e a FCT/UNL e teve como objectivo analisar, do ponto de vista experimental, o comportamento físico e mecânico de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados provenientes de RCD, tendo em conta a adequação da qualidade final do produto (argamassas).

¹⁾Na secção 4.2.1 do Capítulo IV, faz-se uma breve caracterização da empresa SGR, no contexto do presente trabalho

Neste contexto, pretende-se analisar e comparar características físicas e mecânicas de duas argamassas com agregados finos reciclados. Uma das argamassas tem como ligante a cal aérea e outra o cimento. Foram realizados ensaios de caracterização das propriedades dos constituintes, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria dos agregados.

Seguidamente foram estudadas características físicas (absorção de água por capilaridade, massas volúmica real e aparente e porosidade aberta) e mecânicas (resistência a compressão, resistência a tracção, módulo de elasticidade dinâmico e aderência ao suporte).

Após realização dos ensaios, os resultados obtidos serão cuidadosamente analisados e comparados com outros de argamassas homólogas, ao mesmo traço, mas com agregados finos normalizados.

1.3 – Organização da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, incluindo o presente, e dois anexos, da seguinte forma:

- No **Capítulo II** sintetiza-se a revisão bibliográfica efectuada, abordando os aspectos gerais sobre a problemática dos resíduos de construção e demolição gerados pelo sector de construção, nomeadamente os impactes ambientais gerados, as suas principais características e potenciais alvos de aplicação dos mesmos
- No **Capítulo III** descrevem-se os principais resultados obtidos em algumas investigações desenvolvidas relativas à problemática descrita no Capítulo II. Este capítulo serviu essencialmente de comparação aos valores obtidos na campanha experimental do presente estudo
- No **Capítulo IV** descrevem-se os procedimentos de ensaio para a caracterização dos materiais e dos provetes de argamassa utilizados. Apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios efectuados e no fim da apresentação de cada característica mecânica é efectuada uma análise aos resultados obtidos
- No **Capítulo V** comparam-se os resultados obtidos pelos autores referidos no Capítulo III com os resultados obtidos na campanha experimental do presente estudo (Capítulo IV)
- No **Capítulo VI** resumem-se as principais conclusões obtidas no trabalho, confrontam-se os objectivos propostos e os resultados alcançados e indicam-se possíveis desenvolvimentos futuros
- No **Anexo I** apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas ensaiadas
- No **Anexo II** apresenta-se um conjunto de características do agregado fino reciclado fornecidas pela empresa SGR

Todas as figuras e tabelas incluídas no texto sem referência bibliográfica foram obtidas pela autora, com exceção das figuras 2.1, 2.5 e 2.7, que foram fornecidas pela empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA.

Capítulo II

ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TEMA

2.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo é efectuada uma abordagem à temática da sustentabilidade da construção e aos resíduos por ela gerados, como forma de enquadrar o estudo experimental desenvolvido, analisando vantagens e desvantagens da utilização dos resíduos de construção e demolição.

Tendo presente o grande impacto destes resíduos ao nível ambiental, referem-se as suas principais características e classificação e por fim indicam-se os principais alvos de valorização actual dos mesmos.

O enquadramento teórico do tema inclui ainda a análise de alguns trabalhos de investigação, apresentada no Capítulo III.

2.2 – A sustentabilidade da actividade de construção

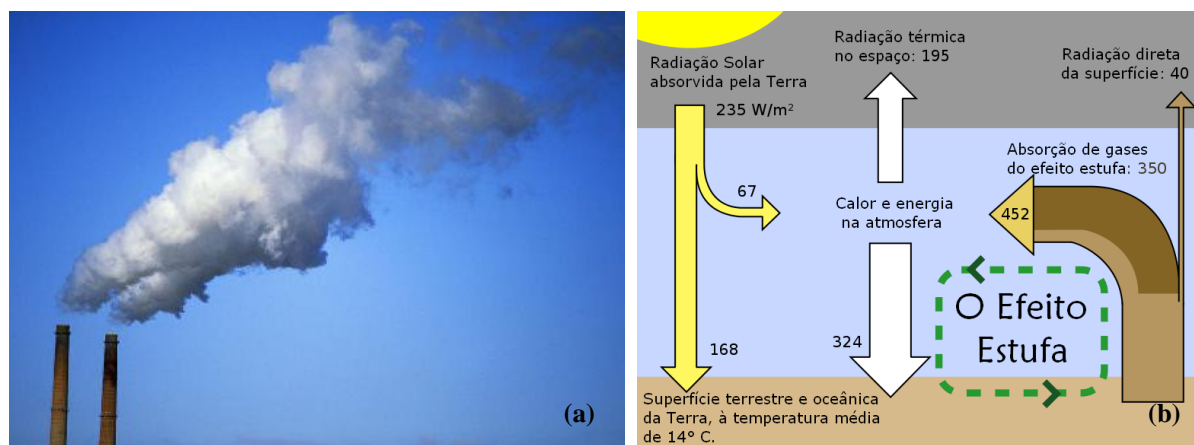
Como foi referido, o sector de construção é responsável por elevados impactes ambientais, não só em termos de emissões de carbono geradas, como do consumo desequilibrado de recursos não renováveis resultantes da extracção de matérias-primas, e da produção de resíduos banais e perigosos, figura 2.1.



a – Lisboa; b – Margem Sul

Figura 2.1 – Depósitos ilegais de resíduos de construção e demolição

As concentrações de gases causadores do efeito estufa têm sofrido um crescente aumento desde o início da era pré-industrial, de cerca de 280 ppm²⁾ para 379 ppm em 2005. Este aumento tem com principal causa a actividade humana, principalmente devido à queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas (Solomon, et al., 2007) figura 2.2.



a – poluição atmosférica; b – efeito de estufa

Figura 2.2 – Principais causas do aquecimento global [56, 57]

O aumento de CO₂ tem como consequência a subida da temperatura do ar, ou seja, o aquecimento global. Tal efeito tem como causa imediata, uma subida do nível da água do mar, provocada pela dilatação térmica da água. Este aspecto tem, evidentemente, efeitos nocivos, ou até, catastróficos no que diz respeito à possível ocorrência de cheias em países susceptíveis a tais fenómenos. Outra das consequências adjacentes à problemática do aquecimento global é a ocorrência de fenómenos climáticos de larga extensão, podendo-se observar, não só períodos de seca de larga duração, como de chuvas torrenciais e furacões (Torgal, et al., 2010).

O impacto ambiental criado pelo sector de construção está directamente relacionado com a extracção de recursos naturais existentes no Planeta, afectando a qualidade e a quantidade de recursos naturais existentes. A actividade de construção constitui, assim, um risco na preservação da biodiversidade, sendo responsável por alterações climáticas, elevados índices de urbanização, exploração de recursos e consequente produção de resíduos, entre outros aspectos.

A população mundial continua a crescer. Neste momento existem cerca de sete mil milhões de habitantes [58], segundo dados fornecidos pelo Gabinete Populacional de Referência e Nações Unidas, em 2050 a população mundial terá cerca de nove mil milhões de habitantes, figura 2.3.

²⁾Razão entre o n.º de moléculas de gases causadores do efeito de estufa e o n.º total de moléculas de ar seco.

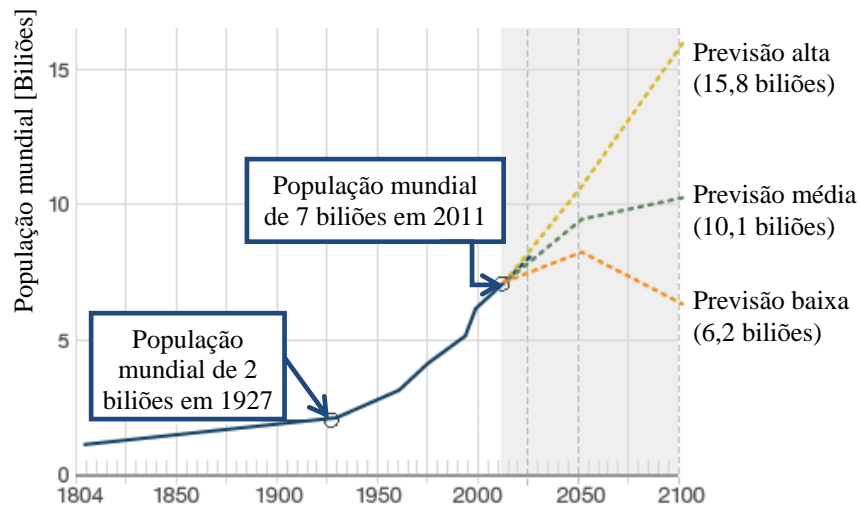


Figura 2.3 – Estimativas e projecções do crescimento da população mundial, de 1804 a 2100 [58]

Quanto maior é o espaço ocupado pelo Homem, menor será o espaço para as outras espécies.

Por outro lado e em termos económicos, uma economia que use mais recursos naturais é uma economia que tem mais impactes na biodiversidade. As alterações económicas que são necessárias fazer no sentido de se reverter estes impactes são muito difíceis de se realizar num contexto de crescimento demográfico intenso em algumas regiões.

O uso excessivo de recursos naturais, aliado a uma grande produção de resíduos é marca de degradação ambiental das sociedades humanas actuais que ainda não se identificam como parte integrante da biosfera. Em 1966 surgiu o termo “*Ecological Footprint*”, desenvolvido por William Rees e Mathis Wackernagel [54]. A pegada ecológica mede a superfície necessária do Planeta Terra para gerar recursos e absorver os resíduos de uma unidade, individuo ou outro (Torgal, et al., 2010). Neste conceito está implícito o impacto que o nosso estilo de vida tem sobre o planeta terra.

A figura 2.4 relaciona as necessidades de recursos naturais por pessoa com a capacidade de oferta de recursos em Portugal, de 1960 a 2005. A biocapacidade varia a cada ano com a gestão dos ecossistemas, as práticas agrícolas (ex. uso de fertilizantes e irrigação), a degradação do ecossistema e clima.

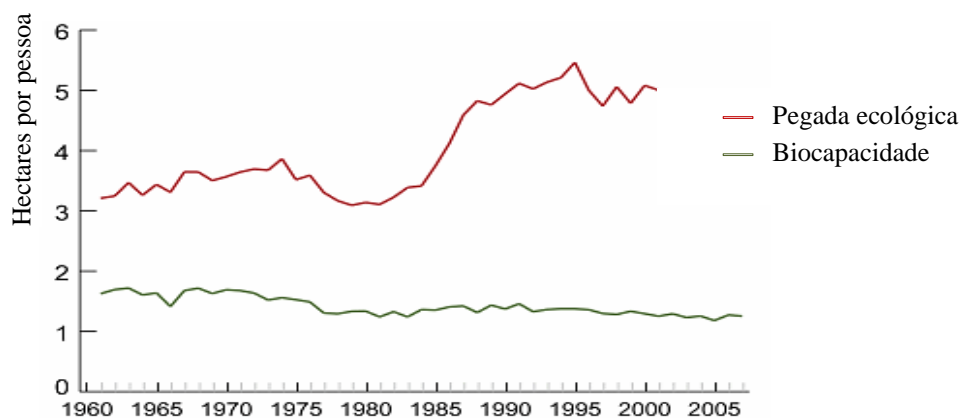


Figura 2.4 – Pegada ecológica respeitante a Portugal, de 1960 a 2005 [53]

Pela magnitude dos seus impactes ambientais, o sector de construção é claramente um sector insustentável, sendo importante agir, o quanto antes, no sentido de se reduzirem os consumos de materiais e outros recursos e de se minimizar as emissões de carbono.

2.2.1 – Abordagem económica da utilização de resíduos de construção e demolição no sector da construção

De acordo com o Living Planet Report (2006) [55], os recursos do Planeta estão a ser utilizados mais rápido do que estes podem ser renovados (We are using the planet's resources faster than they could be renewed). Esta expressão coloca em evidência a problemática actual que enfrenta o Planeta, ou seja, o desequilíbrio que existe entre o consumo de recursos e a capacidade da própria natureza para se regenerar e absorver os resíduos gerados.

Actualmente são utilizados mais de 50% dos recursos naturais disponíveis no Planeta [55], sendo imperativo adoptar novas medidas no sentido de se reverter a situação, antes que esta desenvolva danos irreversíveis para a Humanidade e perceber e analisar quais as razões económicas e ambientais adjacentes à reutilização dos RCD com, pelo menos, a manutenção da qualidade do produto final. Toda esta análise faz sentido, na medida em que se possam criar “novas mentalidades” e desse modo contribuir para a diminuição dos impactes ambientais provocados pelo sector de construção.

Numa perspectiva mais global, dados fornecidos pela Agência Portuguesa do Ambiente revelam que os RCD produzidos na União Europeia ascendem a 290 milhões de toneladas/ano, o que representa 22% do total de resíduos produzidos, mas essa mesma agência adianta que estatísticas mais recentes mencionam o valor de apenas 100 milhões de toneladas/ano. Segundo a mesma fonte, em Portugal, estimou-se uma produção de 7,5 milhões de toneladas respeitantes ao ano de 2005 (APA, 2009).

A quantidade de resíduos gerados em Portugal pela indústria de construção, aliada, até há pouco tempo, à inexistência de legislação referente ao depósito de resíduos, conduz à deposição clandestina dos RCD em aterros.

É então necessário e mais económico, no que diz respeito ao depósito de RCD, criar medidas preventivas contra a acumulação de resíduos.

Segundo R. Spiegel (Spiegel, et al., 1999), a longo prazo, os “produtos verdes”, apesar de mais dispendiosos, podem ajudar a diminuir as perdas económicas associadas à criação de resíduos. Ao seleccionar os materiais em obra, torna-se possível um aproveitamento mais vantajoso dos resíduos gerados.

Outra das vantagens da reutilização de RCD prende-se com a criação de novos postos de trabalho associados a gestão e tratamento desses resíduos. Segundo F. Torgal (Torgal, et al., 2010), a

reciclagem de 80% dos 7,5 milhões de toneladas de RCD gerados anualmente em Portugal, permitiria criar vários milhares de postos de trabalho.

Por fim é relevante proceder a uma análise comparativa entre os custos de produção e de operação de um metro cúbico de agregado reciclado e os custos de uma mesma quantidade de uma areia normalizada. Relativamente aos custos associados a um metro cúbico de agregado reciclado estão incluídos os custos de remoção e tratamento dos resíduos, enquanto a um m³ de areia normalizada estão associados apenas custos de extracção e eventual desidratação.

Economicamente torna-se, a curto prazo, mais dispendioso optar pela utilização de agregados reciclados. Contudo, à medida que o mercado aumenta, o custo tem tendência a diminuir, logo, conjuntamente com os benefícios anteriormente referidos é urgente optar por uma dinâmica de actuação de modo a derrubar este obstáculo económico.

2.3 – Resíduos de construção e demolição

Ao crescimento da indústria da construção está inevitavelmente associada a produção de resíduos. Portugal gera anualmente muitos milhares de toneladas dos mais diversos materiais provenientes dessa mesma actividade. Estes resíduos (RCD) são resultantes de obras de reabilitação ou demolição de construções já existentes bem como da não utilização destes no decorrer de novas construções.

A Portaria n.º 209/2004 classifica os diferentes tipos de resíduos de acordo com a sua fonte geradora, em termos de um código LER – Lista Europeia de resíduos. No âmbito do presente trabalho destacam-se os RCD descritos no capítulo 17 da LER – Resíduos de construção e demolição, incluindo solos escavados de locais contaminados, descritos na tabela 2.1:

Tabela 2.1 – Classificação dos RCD de acordo com a Portaria n.º 209/2004

Material (RCD)	Código LER
Betão, tijolos, ladrilhos, telhas e materiais cerâmicos	17 01
Madeira, vidro e plástico	17 02
Misturas betuminosas, alcatrão e produtos de alcatrão	17 03
Metais (incluindo ligas)	17 04
Solos (incluindo solos escavados de locais contaminados)	17 05
Materiais de isolamento e materiais de construção contendo amianto	17 06
Materiais de construção à base de gesso	17 08
Outros resíduos de construção e demolição	17 09

Segundo estimativas do INE a economia portuguesa gerou, nos últimos seis anos, cerca de 172 milhões de toneladas de resíduos, dos quais, aproximadamente 19 milhões eram resíduos perigosos, o que corresponde a 11% da totalidade global. Segundo a mesma fonte, em 2009 a produção de resíduos sofreu uma diminuição de quase 25% face ao ano anterior, devido sobretudo à forte desaceleração da

produção do sector de construção, fixando-se nos 24 milhões de toneladas, conforme se indica na tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resíduos gerados, em Portugal, por actividade económica – adaptado de “Resíduos gerados em Portugal, 2004-2009”, segundo dados declarados pelo INE, 4 de Agosto de 2010

Actividades económicas	Resíduos gerados ¹⁾ [ton]		
	2009	2008	2007
Agricultura e florestas	228 178	153 974	130 157
Pesca e aquicultura	4 707	5 542	3 406
Indústrias extractivas	5 691 482	1 890 121	3 952 877
Alimentares, bebidas e tabaco	1 101 341	821 786	1 292 641
Têxteis e peles	763 736	1 290 732	1 339 544
Madeira e cortiça	635 940	669 083	842 768
Pasta, papel, cartão e impressão	1330 907	845 036	824 441
Petrolíferas	13 203	17 751	41 323
Químicas, borracha e plásticos	264 271	306 095	392 675
Minerais não metálicos	1 014 774	1 354 141	4 383 120
Metalúrgicas de base e outros produtos metálicos	931 555	1 696 128	860 173
Equipamento eléctrico, electrónico e de transporte	520 649	898 668	808 286
Mobiliário e outras indústrias instalação e manutenção de equip.	505 437	1 104 018	400 266
Energia	268 277	255 035	108 592
Distribuição de água e saneamento	570 200	473 168	604 672
Gestão de resíduos	866 023	1 352 706	1 021 152
Construção	3 152 098	8 148 290	5 674 248
Comércio e serviços	6 445 352	9 781 459	6 213 533
Comércio por grosso de desperdício e sucatas	351 744	527 991	1 344 688
Total	23 659 876	31 591 727	30 240 562

¹⁾A produção de resíduos gerados corresponde aos resíduos encaminhados para operadores de gestão de resíduos.

Entre as quantidades declaradas de resíduos gerados pelos diversos sectores económicos, destacam-se os sectores da construção, indústria mineira e de extracção de agregados e de minerais não metálicos como as actividades geradoras de maior quantidade de resíduos.

Pela sua abundância, a produção de resíduos constitui um problema actualmente sem uma solução aceitável mas que terá obrigatoriamente de ser resolvido, a fim de atingir a sustentabilidade na indústria da construção. De forma a contribuir para a redução dos impactes negativos provocados pelos RCD, torna-se necessária a criação de medidas que os valorizem e ao mesmo tempo contribuam para a sua prevenção. Segundo D. Algarvio (Algarvio, 2005), a prevenção é prioridade para a correcta

gestão de resíduos. Uma correcta gestão de resíduos contribui, não só para a diminuição do elevado volume produzido (que resulta do desaproveitamento de materiais durante a obra e da falta de soluções para a sua valorização/reciclagem) mas também para a consciencialização dos produtores desses resíduos, o que tem contribuído para o aparecimento de depósitos ilegais, normalmente associados à deposição de outros resíduos, com problemas de saúde pública, degradação da paisagem e contaminação ambiental, figura 2.5.



Figura 2.5 – Contaminação ambiental provocada pela deposição ilegal de RCD

Actualmente, apesar de existir uma grande quantidade de serviços de recolha e transporte são poucos os locais legais para descarga, verificando-se, na sua maioria, que esta é feita em locais impróprios.

A maioria dos resíduos resultantes da actividade de construção tem como destino final aterros sem qualquer tratamento que providencie a sua prevenção e valorização.

De acordo com A. Gonçalves (Gonçalves, 2001), o despejo descontrolado dos resíduos de construção e demolição tem efeitos sobre o meio ambiente, económico e social. A deposição ilegal de RCD sem tratamento tem como efeitos, a nível ambiental, alterações na qualidade do ar e do solo, sendo também causadora de riscos de saúde pública. A nível económico, a existência de aterros tem como causa imediata a redução do valor de mercado dos bens imóveis do local, bem como dos terrenos circundantes. Por fim e numa perspectiva social a criação de um aterro afecta a qualidade de vida existente em toda a área que o circunda.

Para uma correcta prevenção dos RCD é necessária uma interacção entre todos os intervenientes da construção civil, durante todas as fases do processo (Algarvio, 2005). Numa fase inicial, de projecto, recorrendo a uma selecção dos materiais a utilizar em obra, através da escolha de materiais com potencial reciclabilidade é possível obter um melhor aproveitamento dos resíduos gerados. Posteriormente, na fase de construção, a correcta separação dos resíduos facilita o encaminhamento destes para a valorização ou deposição. Por fim, na fase de demolição, o prolongamento da vida útil do edifício/estrutura potencia uma redução na quantidade de resíduos gerados, no entanto, quando a

demolição é inevitável, a qualidade dos RCD gerados pode ser melhorada através da demolição selectiva ou desconstrução (Algarvio, 2005), figura 2.6.

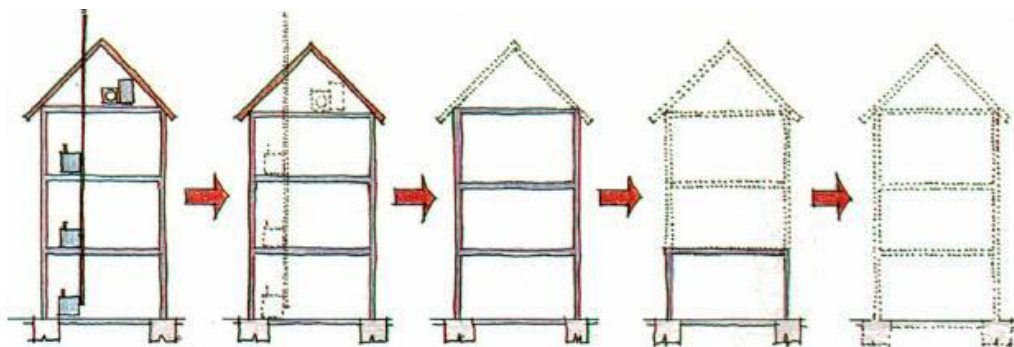


Figura 2.6 – Processo de demolição selectiva (Lourenço, 2007)

A desconstrução, entendida como a “desmontagem” do edifício, no sentido inverso ao da sua construção, tem como objectivo a reutilização de componentes e materiais de construção. A reutilização imediata desses materiais em novas construções ou em já existentes permite manter o seu valor económico actual (Abdol, et al., 2003; Torgal, et al., 2010).

Após a prevenção é necessário proceder à valorização dos RCD, ou seja, muitos dos resíduos industriais gerados na actividade da construção, através da triagem e reciclagem, podem constituir-se como matérias-primas noutras indústrias.

O processo de selecção/triagem, visando o reaproveitamento dos resíduos produzidos numa obra, pode ser dividido em duas partes distintas: a triagem feita na própria obra através da colocação dos diferentes materiais nos respectivos pontos de armazenamento que lhes estão associados, e a triagem posterior dos materiais, daí provenientes, em linhas especialmente concebidas para esse efeito, onde a separação é feita recorrendo a meios mecânicos. Na figura 2.7, apresenta-se um diagrama de um processo de tratamento dos RCD utilizado por uma unidade de produção de agregados reciclados.

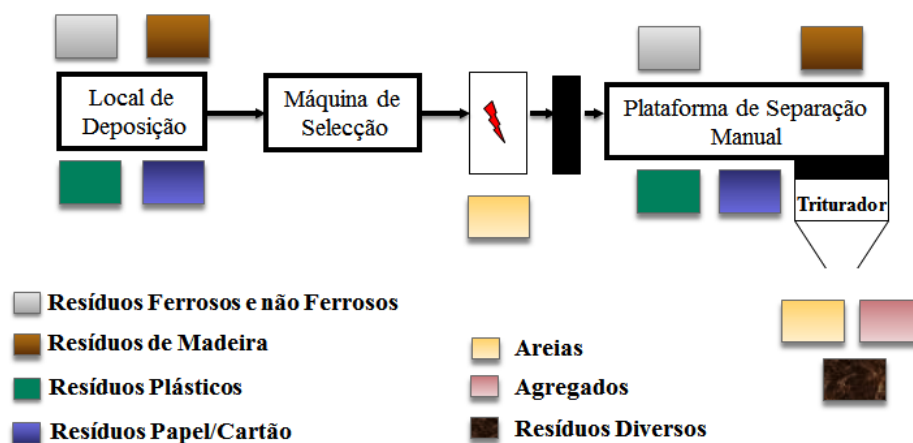


Figura 2.7 – Processo de tratamento dos RCD

Os RCD são resíduos de constituição muito heterogénea, com fracções de dimensões variadas, o que se traduz numa dificuldade ao nível da triagem dos materiais e com composição química muitas vezes distinta. De acordo com F. Torgal (Torgal et al., 2010), a triagem constitui uma das etapas fundamentais no processo de valorização dos RCD, esta permite a separação das fracções dos RCD consoante a sua natureza. O processo de triagem, quando bem efectuado, contribui para a redução da contaminação dos agregados reciclados.

Uma das grandes vantagens adjacentes à valorização dos RCD prende-se com a reutilização deste como agregado reciclado. São por isso e segundo D. Algarvio (Algarvio, 2005) “ecomateriais”, concebidos para minimizar os impactes no ambiente apresentando um preço competitivo.

2.3.1 – Classificação dos resíduos

De acordo com P. Gonçalves (Gonçalves, 2007) os resíduos de construção civil apresentam características diversificadas em relação à sua origem, quantidades, composição e destino final.

Quanto à sua origem, praticamente todas as actividades desenvolvidas no sector da construção civil são geradoras de resíduos. Assim sendo e tendo em conta o tipo de obra do qual são provenientes, podem ser classificados como: resíduos de construção, resíduos de remodelação, reabilitação e renovação e resíduos de demolição (Algarvio, 2005). Os primeiros resultam, na maior parte dos casos, do mau aproveitamento de matérias-primas, de danos nos materiais e dos desperdícios decorrentes das próprias técnicas de construção. Apresentam igualmente na sua constituição restos de embalagens associadas ao transporte e armazenamento dos materiais a serem utilizados no processo construtivo.

Os resíduos de remodelação, reabilitação e renovação são resíduos de composição muito heterogénea, dependendo do tipo de reabilitação em causa bem como a área a ser intervencionada, apresentando características muito próximas às dos resíduos de demolição. Os resíduos de demolição apresentam-se em maior quantidade, são constituídos maioritariamente por material inerte e solos. A sua composição é função do tipo de obra a ser demolida e do grau de selectividade da demolição.

Na tabela 2.2 (Ferreira, 2009) apresenta-se a percentagem média para o mesmo espaço comunitário, de cada um dos três tipos de resíduos referidos.

Tabela 2.3 – Tipo de resíduos e a sua percentagem no espaço comunitário (Ferreira, 2009)

Tipo¹⁾	Percentagem [%]
Resíduos de construção	10 – 20
Resíduos de remodelação, reabilitação e renovação	30 – 40
Resíduos de demolição	40 – 50

¹⁾De acordo com a sua origem

O sector da construção civil apresenta-se como um dos sectores económicos que mais se destaca em termos de quantidade de resíduos gerados. Este sector possui uma gama muito alargada de técnicas e metodologias de produção, características como a composição e quantidade produzida estão condicionadas por parâmetros específicos da região geradora do resíduo bem como o tipo de obra em questão.

Segundo P. Gonçalves (Gonçalves, 2007), a composição dos RCD é muito variável, dependendo do tipo de obra a ser demolida, da sua localização geográfica, da época de construção e do tipo de utilização que a obra mantinha enquanto funcional.

Os resíduos gerados pela construção civil são talvez o grupo de resíduos industriais que possui uma composição mais heterogénea. Estes resíduos são constituídos por materiais típicos de construção tais como: argamassas, betões, materiais cerâmicos, areia, brita, madeira, metais, papéis, plástico, entre outros. Na figura 2.8 apresentam-se valores médios de composição dos RCD obtidos por Gonçalves, tendo em consideração várias estimativas e estatísticas pesquisadas pelo autor (Gonçalves, 2007). Quanto à composição química está dependente da composição associada a cada um dos seus constituintes.

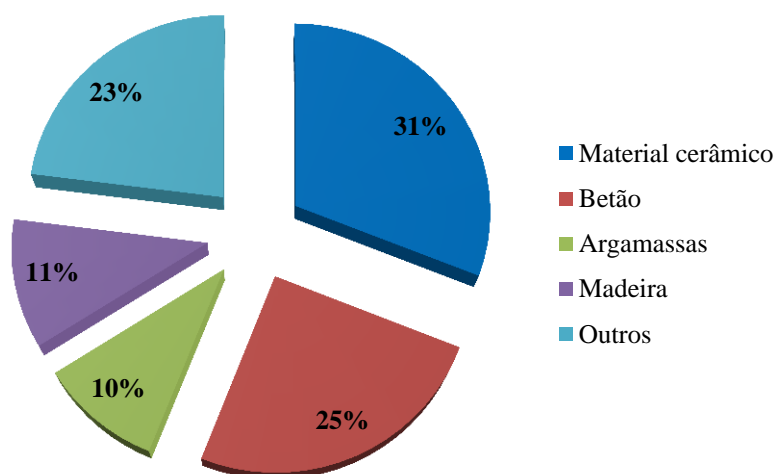


Figura 2.8 – Valores médios da principal composição dos RCD (Gonçalves, 2007)

Com base na figura 2.8, pode-se concluir que, pelas quantidades declaradas, o betão apresenta-se como um dos materiais mais abundantes na constituição dos RCD. Os betões apresentam-se como uma das soluções de reciclagem dos RCD.

O destino dos resíduos depende da sua capacidade de valorização/reciclagem, assim como do desenvolvimento de novas e melhores soluções que visem o seu reaproveitamento.

A produção de RCD constitui um problema maioritariamente de carácter ambiental e pela magnitude dos seus impactes é importante garantir um destino adequado para os mesmos.

2.3.2 – Aplicabilidade dos RCD na construção

Os RCD, quando correctamente geridos, podem dar origem a soluções bastante sustentáveis. Neste sentido, faz-se uma síntese geral das principais formas de reutilização dos RCD, nomeadamente no fabrico de betões, argamassas, pavimentos rodoviários e sistemas drenantes.

Ao observarmos todo o processo de tratamento dos RCD, há uma enorme percentagem de agregados produzidos, tanto na produção de uma fracção mais fina de agregados como na produção de fracções mais graúdas (Gonçalves, 2007). Alguns betões (nomeadamente aqueles em que a resistência mecânica não seja uma característica muito importante) apresentam-se como a solução mais óbvia na reutilização da fracção mais grossa de agregado, uma vez que as partículas mais finas se tornam prejudiciais para as propriedades do betão. Por outro lado, a fracção mais fina de RCD pode ser reutilizada na produção de argamassas, tendo em consideração os prós e contras quando comparadas com argamassas convencionais.

De acordo com P. Gonçalves (Gonçalves, 2007), o agregado reciclado, por apresentar grandes variações de composição, distribuição granulométrica ou existência de impurezas, poderá produzir revestimentos com uma variação de desempenho significativa. Contudo, M. Braga (Braga, 2010) e C. Neno (Neno, 2010) concluíram que, para as percentagens³⁾ utilizadas de substituição de areia por agregados reciclados, as argamassas com agregados reciclados apresentaram desempenhos que demonstraram a sua viabilidade como soluções de revestimento.

A utilização de RCD na construção de pavimentos rodoviários, nomeadamente em camadas de base e sub-base, não exigindo um controle a nível granulométrico, apresenta-se como a solução mais simples e económica de reutilização dos mesmos (Gonçalves, 2007).

Os RCD podem também ser utilizados como sistemas de drenagem. A fracção mais grossa de agregados reciclados por ser mais porosa apresenta elevada absorção de água, tornando-se numa vantagem em áreas com dificuldades de escoamento (Gonçalves, 2007). Segundo F. Affonso (Affonso, 2005), os RCD apresentam permeabilidade suficiente para um correcto desempenho das suas funções em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos.

³⁾Braga (2010) estudou argamassas com percentagens de substituição de 5, 10 e 15%; C. Neno (2010) estudou argamassas com percentagens de substituição de 20, 50 e 100%.

Capítulo III

TRABALHOS EXPERIMENTAIS DE REFERÊNCIA

3.1 – Considerações iniciais

Referem-se neste capítulo trabalhos de investigação desenvolvidos sobre o comportamento de argamassas com agregados finos reciclados.

Apesar da extensa bibliografia existente, relativa à utilização de agregados reciclados em argamassas de cimento, o mesmo não sucede com a sua utilização em argamassas de cal aérea. Neste sentido, indicam-se também trabalhos de investigação nos quais foram ensaiadas argamassas de cal aérea e agregado normalizado.

A pesquisa bibliográfica é apresentada em quatro secções:

- na secção 3.2, apresenta-se o levantamento bibliográfico sobre argamassas de cimento com agregados finos reciclados
- na secção 3.3, referem-se trabalhos de investigação sobre o comportamento de argamassas de cal aérea
- na secção 3.4, apresenta-se sob a forma de tabela um resumo dos principais resultados obtidos pelos autores referidos nas secções anteriores, por forma a facilitar o enquadramento de resultados realizado no Capítulo V
- na secção 3.5, apresenta-se uma revisão sobre as principais características físicas dos agregados finos reciclados. Considerou-se esta abordagem relevante para uma melhor compreensão sobre o desempenho deste material, permitindo deste modo contribuir para o enquadramento do ensaio experimental realizado

Os resultados desta pesquisa bibliográfica procuram servir de referência aos valores obtidos para cada uma das “argamassas tipo” estudadas na presente campanha experimental.

3.2 – Argamassas de cimento

Nesta secção, apresenta-se o levantamento bibliográfico de resultados obtidos noutras campanhas experimentais levadas a cabo sobre argamassas de cimento com agregados finos reciclados, comparativamente com as tradicionais.

3.2.1 – Trabalhos experimentais

Esta fase da pesquisa bibliográfica incidiu nos trabalhos de investigação identificados na tabela 3.1, relacionados com o estudo do desempenho de argamassas de cimento com agregados finos reciclados. Posteriormente apresentam-se os principais resultados obtidos nos diferentes trabalhos analisados, para efeitos de comparação com os valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Tabela 3.1 – Trabalhos experimentais de referência (argamassas de cimento e RCD)

Unidade de investigação	Autor(es)	Título do trabalho
Instituto Superior Técnico, Lisboa	M. Braga (2010)	Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão – efeito de filler e pozolânico
	C. Neno (2010)	Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD
Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil	S. Levy; H. Paulo (1997)	Vantagens e desvantagens de argamassas produzidas com entulho de obra, finamente moído
	L. Miranda (2001)	Estudo de factores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil	C. Bavaresco (2001)	Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas

M. Braga (Braga, 2010) realizou estudos sobre argamassas com diferentes percentagens de incorporação de agregados finos provenientes da trituração de betão, com o intuito de avaliar a viabilidade da sua utilização em argamassas de revestimentos. Neste estudo a autora (Braga, 2010) incidiu sobre dois vectores de investigação diferentes: a incorporação de finos de betão em argamassas com diferentes taxas de incorporação (0, 5, 10 e 15%) e redução do teor de cimento (traços 1:4; 1:5 e 1:6) com determinada taxa de incorporação de agregados finos de betão, determinada na primeira etapa. No entanto, para a presente dissertação apenas serviram de referência as argamassas estudadas no primeiro vector de investigação, todas elas ao traço volumétrico 1:4. O estudo realizado, para além dos três principais constituintes de uma argamassa convencional, (água, areia e ligante) apresenta a incorporação de um quarto constituinte – finos de betão, provenientes da demolição de construções já existentes.

O cimento utilizado foi o cimento Portland composto tipo CEM II – 32,5 e a areia proveniente do rio Tejo. Na tabela 3.2 apresentam-se as taxas de incorporação de agregados finos de betão utilizadas produção das argamassas na primeira etapa da campanha experimental.

Tabela 3.2 – Composição das argamassas produzidas por M. Braga (Braga, 2010)

Designação	Taxa de incorporação de finos de betão [%]	Traço
I (0 - 1:4)	0	1:4
I (5 - 1:4)	5	
I (10 - 1:4)	10	
I (15 - 1:4)	15	

Para comparação de valores obtidos na campanha experimental da presente dissertação, serviram de referência apenas as seguintes composições de argamassa:

- argamassa de cimento e 15% de agregado reciclado ao traço volumétrico 1:4
- argamassa de cimento e areia ao traço volumétrico 1:4

No início da campanha experimental de M. Braga (Braga, 2010) foram realizados ensaios de caracterização dos principais constituintes das argamassas produzidas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria (tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por M. Braga (Braga, 2010)

Característica	Cimento	Areia de rio	Finos de betão
Baridade [kg/m ³]	1035	1433	842 ¹⁾
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	-	5
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	-	0,149

¹⁾Agregados finos reciclados com granulometria inferior a 0,149mm

As diferentes argamassas estudadas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Através desses provetes, que sofreram diferentes tipos de cura em ambiente seco, caracterizou-se a argamassa endurecida. Previamente à moldagem dos provetes, foram estabelecidos valores médios de espalhamento de 71% para as argamassas de cimento e areia e de 72% para as argamassas de cimento e 15% de agregado fino reciclado.

Na tabela 3.4 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Estes resultados servem de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento e agregado reciclado estudadas por M. Braga (Braga, 2010)

Características estudadas		Resultados obtidos		Idade [dias]
		0%	15%	
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	7110	10620	28
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	1,36	2,71	
	Resistência à compressão [MPa]	3,91	8,64	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1725,84	1814,46	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ¹⁾	9,84	5,48	

¹⁾Ensaio realizado com meios provetes ($\approx 8\text{cm} \times 4\text{cm} \times 4\text{cm}$)

Depois de realizados os ensaios de caracterização previstos na primeira fase de ensaios, escolheu-se entre as três argamassas estudadas a que melhor desempenho demonstrou, ou seja, a argamassa com 15% de finos de betão na sua constituição. Neste sentido, foram realizados ensaios de caracterização mais aprofundados da argamassa de referência e da argamassa escolhida (15%), nomeadamente o ensaio de aderência ao suporte, cujos resultados médios obtidos encontram-se representados na tabela 3.5. Estes resultados servem de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Tabela 3.5 – Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por M. Braga (Braga, 2010)

Designação	Tensão aderência ao suporte [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Tipologia de rotura	Idade [dias]
I (0 - 1:4)	0,33	0,11	coesiva	28
I (15 - 1:4)	0,45	0,04	adesiva	

C. Neno (Neno, 2010) [*Tabela 3.1*] desenvolveu o terceiro vector que completa o estudo juntamente realizado com M. Braga (2010) – Reciclagem dos agregados. A autora (Neno, 2010) realizou estudos sobre argamassas produzidas com diferentes percentagens de incorporação de agregados finos reciclados de betão (20, 50 e 100%), com o objectivo de avaliar o seu comportamento face às argamassas convencionais. Para tal, numa primeira fase, foram ensaiadas três argamassas com diferentes taxas de substituição de 20, 50 e 100%. Na segunda fase e de acordo com os resultados obtidos, foram aprofundados os ensaios sobre a argamassa que apresentou melhor desempenho na primeira fase de ensaios (20%).

Foi utilizado o cimento Portland composto tipo CEM II/B-L Classe 32,5N, areia proveniente do rio Tejo e agregados finos reciclados de betão obtidos por trituração de blocos de betão, figura 3.1.



a – blocos de betão utilizados para obtenção dos agregados; b – britagem do betão

Figura 3.1 – Processo de obtenção dos agregados finos reciclados produzidos por C. Neno (Neno, 2010)

Na campanha experimental em causa, a autora (Neno, 2010) definiu um total de quatro argamassas, mantendo a curva granulométrica da areia e variando entre si a percentagem de incorporação de agregados finos de betão, tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Composição das argamassas produzidas por C. Neno (Neno, 2010)

Designação	Taxa de incorporação de finos de betão [%]	Traço
0%	0	1:4
20%	20	
50%	50	
100%	100	

Para a presente dissertação apenas serviram de referência as seguintes composições de argamassas estudadas na primeira fase de investigação:

- argamassa de cimento e 100% de agregado reciclado ao traço volumétrico 1:4
- argamassa de cimento e areia ao traço volumétrico 1:4

No início desta campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização dos constituintes das argamassas produzidas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria, tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Neno (Neno, 2010)

Característica	Cimento	Areia de rio	Finos de betão
Baridade [kg/m^3]	1035,4	1432,5	842 ¹⁾
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	-	4,76
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	-	0,149

¹⁾Agregados finos reciclados com granulometria inferior a 0,149mm.

Foram moldados mecanicamente vários provetes de argamassa de diferentes tipos, entre os quais provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Através desses provetes, que sofreram diferentes tipos de cura em ambiente seco, caracterizaram-se as argamassas no seu estado endurecido. Previamente à moldagem dos provetes, foram estabelecidos valores médios de espalhamento de 76% para as argamassas de cimento e areia e de 70% para as argamassas de cimento e 100% de agregado fino reciclado. Na tabela 3.8 apresentam-se os principais resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas. Estes resultados servem de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Tabela 3.8 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento e agregado reciclado estudadas por C. Neno (Neno, 2010)

Características estudadas		Resultados obtidos		Idade [dias]
		0%	100%	
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	7070	-	28
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	1,36	2,15	
	Resistência à compressão [MPa]	3,91	7,38	
Físicas	Massa volúmica [kg/m ³]	1725,84	1569,51	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ¹⁾	9,84	7,44	

¹⁾Ensaio realizado com meios provetes (≈ 8cm×4cm×4cm)

Para a segunda fase de ensaios, escolheu-se a argamassa com melhor desempenho na primeira fase, ou seja, a argamassa com 20% de finos de betão na sua constituição. Depois foram realizados ensaios de caracterização mais aprofundados da argamassa de referência e da argamassa escolhida (20%), nomeadamente o ensaio de aderência ao suporte, cujos resultados médios obtidos encontram-se representados na tabela 3.9. Estes resultados servem de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

Tabela 3.9 – Resultados médios obtidos no ensaio de aderência ao suporte obtidos por C. Neno (Neno, 2010)

Designação	Tensão de aderência ao suporte [MPa]	Desvio padrão [MPa]	Tipologia de rotura	Idade [dias]
0%	0,33	0,11	adesiva	28
20%	0,27	0,05	adesiva/coesiva	

S. Levy e H. Paulo (Levy, et al., 1997) [Tabela 3.1] estudaram a influência exercida por cada componente de RCD, finamente moído, no desempenho das argamassas. Para tal, os autores (Levy, et

al., 1997) produziram um conjunto de oito argamassas diferentes utilizando cimento, quatro combinações diferentes de entulho e areia lavada.

Os resíduos foram produzidos em laboratório, apresentando na sua constituição materiais cerâmicos e argamassas mistas endurecidas. Foi utilizado o cimento Portland Composto do tipo II-E-32 e areia lavada média de rio. Na tabela 3.10 apresenta-se a percentagem de incorporação de resíduos utilizados na produção das argamassas, bem como os respectivos traços utilizados.

Tabela 3.10 – Composição das argamassas produzidas por S. Levy e H. Paulo (Levy, et al., 1997)

Designação	Taxa de incorporação de resíduos [%]		Traços em volume (cimento: adição: areia)	
	Material Cerâmico	Argamassas Endurecidas		
C ⁴	100	0	1:3:8	1:1,5:6
Ca	66	34		
cA	34	66		
A	0	100		

Como forma de melhor enquadrar os resultados obtidos na campanha experimental da presente dissertação, serviu de referência apenas a argamassa de cimento e agregados reciclados ao traço volumétrico 1:1,5:6 (Ca).

As diferentes composições de argamassas foram moldadas e compactadas de diferentes tipos, produzindo provetes cilíndricos de 5cm×10cm, utilizados nos ensaios de determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico e provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm, utilizados nos ensaios de determinação da resistência à tracção por flexão.

Na tabela 3.11 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas endurecidas ao traço 1:1,5:6.

Tabela 3.11 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cimento e agregados reciclados (Ca) estudadas por S. Levy e H. Paulo (Levy, et al., 1997)

Características estudadas		Resultados obtidos [MPa]	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	2500	28
	Resistência à tracção por flexão	0,20	
	Resistência à compressão	5,30	

¹⁾Traço 1:1,5:6, em volume

O trabalho de investigação realizado por L. Miranda (Miranda, 2000) [Tabela 3.1] serviu também de referência para comparação de valores obtidos na campanha experimental do presente estudo. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais a provetes de argamassa de diferentes composições, com o objectivo de propor parâmetros preventivos à fissuração de revestimentos de argamassas com

agregados reciclados. No entanto, para a presente dissertação serviram de referência apenas as composições de argamassa representadas na tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Composição das argamassas estudadas por L. Miranda (Miranda, 2000)

Designação	Composição das argamassas estudadas [%]			
	Material cerâmico	Argamassa	Betão	Teor total de finos ¹⁾
E2	55	45	0	46
E4	0	100	0	40
E6	0	45	55	40

¹⁾Teor total de finos inferior a 75µm.

No início da campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria. Na tabela 3.13 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados utilizados.

Tabela 3.13 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estudados por L. Miranda (Miranda, 2000)

Característica	Material cerâmico	Argamassa	Betão
Máxima dimensão do agregado [mm]	4,8	0,55	4,8
Módulo de finura	1,27	0,74	1,78
Baridade [kg/m ³]	1270	1320	1530

As argamassas foram produzidas ao traço 1:9 (cimento: agregado reciclado) com agregado reciclado de diferentes materiais, por forma a se aproximar da composição de agregado reciclado gerado por alvenarias demolidas. Os agregados reciclados foram previamente triturados, tendo-se utilizado apenas a parcela com partículas com a dimensão inferior a 4,8mm. Foi utilizado o cimento Portland Composto tipo CP II/E 32 N e o agregado reciclado proveniente de materiais novos da região de São Paulo.

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com T=24±5°C e Hr=55±10%, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas estudadas por L. Miranda (Miranda, 2000)

Características estudadas		Resultados obtidos [MPa]			Idade [dias]
		E2	E4	E6	
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	8000	3500	7000	28
	Resistência à tracção por flexão	1,75	1,11	1,74	
	Resistência à compressão	7,39	3,71	7,44	

C. Bavaresco (Bavaresco, 2001) [Tabela 3.1] avaliou o comportamento de argamassas executadas com agregados finos reciclados provenientes de demolições e reabilitações. Para tal, foram estudadas argamassas produzidas com diferentes percentagens de substituição de agregados reciclados por agregado natural. O agregado reciclado sofreu uma triagem com o intuito de separá-lo em duas composições, uma composta maioritariamente por material cerâmico (AGR-I) e outra por material constituído por argamassas e betão endurecido (AGR-II). Todos os resíduos foram previamente triturados, tendo-se utilizado apenas a parcela com partículas com a dimensão menor do que 4,8mm. Foi utilizado o cimento Portland composto com filer CP II F 32 N da marca Votoran, cal aérea hidratada em pó da marca Minersol e agregado natural proveniente da região de Florianópolis. Na tabela 3.15 apresentam-se as argamassas produzidas pelo autor, aos traços 1:1:6 e 1:2:9 (cimento: cal: agregado).

Tabela 3.15 – Composição das argamassas produzidas por C. Bavaresco (Bavaresco, 2001)

Designação	Composição das argamassas estudadas [%]			
	AGR-I	Areia Normalizada	Areia Natural	AGR-II
1	100	-	-	-
2	50	50	-	-
3	70	30	-	-
4	-	-	-	100
5	-	50	-	50
6	-	30	-	70

Para a presente dissertação serviram de referência as seguintes composições de argamassa:

- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e 100% de AGR-I ao traço volumétrico 1:1:6 (1)
- Argamassa bastarda de cimento, cal aérea e 100% de AGR-II ao traço volumétrico 1:1:6 (4)

No início da campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria. Na tabela 3.16 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados utilizados.

Tabela 3.16 – Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estudados por C. Bavaresco (Bavaresco, 2001)

Característica	Areia normalizada	Areia natural	AGR -I (material cerâmico)	AGR-II (betão endurecido)
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	4,8	2,4	2,4
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	0,15	0,15	0,15
Módulo de finura	-	2,61	2,29	3,03
Baridade [kg/m ³]	2670	2600	2390	2600

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes cilíndricos de 5cm×10cm, figura 3.2. Previamente à moldagem dos provetes foi estabelecido um limite inicial de espalhamento da ordem dos 230±10mm. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente condicionado, figura 3.2, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.17.



Figura 3.2 – Provetes em ambiente de cura estudados por C. Bavaresco (Bavaresco, 2001)

Tabela 3.17 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas bastardas estudadas por C. Bavaresco (2001)

Características estudadas		Resultados obtidos		Idade [dias]
		AGR -I	AGR -II	
Mecânicas	Resistência à compressão [MPa]	9,42	4,69	28
	Tensão de aderência ao suporte ¹⁾ [MPa]	0,26	0,34	

¹⁾Todos os provetes com tipologia de rotura adesiva

3.3 – Argamassas de cal aérea

Nesta secção, analisam-se os principais resultados obtidos por diferentes investigações realizadas sobre o comportamento de argamassas de cal aérea com agregados finos normalizados, para uma melhor compreensão do desempenho das argamassas de agregados finos reciclados e cal aérea.

3.3.1 – Trabalhos experimentais

Esta fase da pesquisa bibliográfica incidiu nos trabalhos de investigação identificados na tabela 3.18, relacionados maioritariamente com o estudo do desempenho de argamassas à base de cal aérea.

Tabela 3.18 – Trabalhos experimentais de referência (argamassas de cal aérea)

Unidade de investigação	Autor(es)	Título do Trabalho
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa	P. Faria (2004)	Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: contribuição para o estudo da influência dos ligantes
	P. Faria; F. Henriques (2004)	Current mortar in conservation: an overview
	V. Rato (2006)	Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas
	F. Pinho (2007)	Paredes de alvenaria “ordinária” – Estudo experimental com modelos simples e reforçados
	C. Barreto (2010)	Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)	M. Veiga <i>et al</i> (2004)	Conservação e renovação de paredes de edifícios antigos
Izmir Institute of Technology, Turkey	H. Böke <i>et al</i> (2006)	Characteristics of brick used as aggregate in historic brick lime mortars and plasters

Seguidamente apresentam-se os principais resultados obtidos nos diferentes trabalhos analisados, por forma a servir de referência aos valores obtidos na presente campanha experimental.

No estudo realizado por P. Faria (Faria, 2004) foram efectuados ensaios experimentais em provetes de vários tipos de argamassa, com o objectivo de avaliar a influência do tipo de ligante no comportamento das mesmas.

Para a presente dissertação serviu de referência a argamassa de cal aérea e cimento ao traço volumétrico 1:3, na qual foi utilizada cal aérea hidratada em pó da marca Lusical e areia de rio, sujeita a peneiração prévia.

Primeiramente foram realizados ensaios de caracterização das matérias-primas utilizadas na preparação das argamassas, nomeadamente a determinação da baridade e granulometria. Na análise granulométrica da areia de rio analisada, os valores obtidos para a máxima e mínima dimensão do agregado foram de 2,38mm e 0,297mm, respectivamente e o módulo de finura igual a 2,7.

Na tabela 3.19 apresentam-se os valores médios obtidos no ensaio de determinação da baridade de cada constituinte utilizado.

Tabela 3.19 – Baridade dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por P. Faria (Faria, 2004)

Material	Baridade [kg/m³]
Cal aérea	570
Cimento	1590
Areia de rio	1280

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Previamente à moldagem dos provetes, foram estabelecidos valores médios de espalhamento de 74% para as argamassas de cal aérea e de 67% para argamassas bastardas de cimento, cal aérea e areia. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com T=23±3°C e Hr=50±5%, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por P. Faria (Faria, 2004)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2300	60
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,33	
	Resistência à compressão [MPa]	0,65	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1720	
	Porosidade Aberta [%]	34	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ¹⁾	22,2	
	Valor assíptótico [kg/m ²]	18,1	

¹⁾Ensaio realizado com meios provetes (≈8cm×4cm×4cm)

O trabalho de investigação realizado por P. Faria e F. Henriques (Faria, et al., 2004) [Tabela 3.18] também serviu de referência para comparação de valores obtidos na presente dissertação. Neste trabalho recorreu-se a uma campanha experimental com o objectivo principal de apresentar uma comparação evolutiva de várias formulações de argamassas de substituição, frequentemente utilizadas em edifícios antigos.

Para a presente dissertação apenas interessa considerar os resultados obtidos na argamassa de cal aérea hidratada e areia de rio ao traço volumétrico 1:3 (ligante:areia).

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Previamente à moldagem dos provetes foi estabelecido um valor médio de espalhamento de 74% para as argamassas de cal aérea. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com $T=20^{\circ}\text{C}$ e $Hr=50\%$, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por P. Faria e F. Henriques (Faria, et al., 2004)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2300	60
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,35	
	Resistência à compressão [MPa]	0,65	
Físicas	Porosidade Aberta [%]	34	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [$\text{kg/m}^2.\text{h}^{1/2}$]	19,32	
	Valor assintótico [kg/m^2]	17,9	

O trabalho de investigação realizado por V. Rato (Rato, 2006) [Tabela 3.18] teve como objectivo avaliar a relação entre o tipo de ligante e a granulometria das areias, as propriedades da microestrutura morfológica e o comportamento das argamassas. Para tal foram preparadas várias composições de argamassa diferentes que incluíram quatro tipos de ligante (cal aérea, cal hidráulica, cimento branco e um ligante misto composto por cal aérea e cimento Portland corrente) e dezasseis areias de granulometria distinta.

No entanto, para o presente trabalho serviram apenas de referência os resultados obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea ao traço volumétrico 1:3, nos quais foi utilizada a cal aérea hidratada em pó da marca Lusical. As argamassas foram preparadas com quatro areias monogranulares e duas misturas de areias, uma vez que a influência da granulometria era um dos parâmetros a avaliar nesse estudo. Para o presente estudo, decidiu-se considerar, como referência, a areia cuja máxima e mínima dimensão do agregado mais se aproximasse da areia de rio aqui utilizada. Assim sendo serviu de referência a areia com máxima dimensão de 2,36mm e mínima dimensão de 0,5mm.

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Antes da moldagem dos provetes, foi estabelecido um intervalo de espalhamento a variar entre os 70 e 75%. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com $T=23\pm 3^{\circ}\text{C}$ e $Hr=50\pm 5\%$, figura 3.3, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.22.



Figura 3.3 – Provets desmoldados em ambiente de cura estudados por V. Rato (Rato, 2006)

Tabela 3.22 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por V. Rato (Rato, 2006)

Características estudadas		Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	1793	60
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,23	
	Resistência à compressão [MPa]	0,48	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1705	
	Porosidade Aberta [%]	34	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ²⁾	18,36	
	Valor assintótico [kg/m ²] ¹⁾	18,61	

¹⁾Ensaio realizado com provets inteiros.

O trabalho de investigação realizado no DEC – FCT/UNL por F. Pinho (Pinho, 2007) [Tabela 3.18] serviu também de referência para comparação de valores da presente dissertação. O trabalho consistiu na análise, através da realização de ensaios mecânicos de compressão axial e de compressão de corte, de diversas soluções de reforço aplicadas a modelos experimentais de alvenaria de pedra tradicional. Na figura 3.1 apresentam-se imagens da construção dos muretes.



Figura 3.4 – Construção dos modelos experimentais estudados por F. Pinho (Pinho, 2007)

Para a presente dissertação serviram de referência as características físicas e mecânicas da argamassa de assentamento dos muretes de alvenaria de pedra tradicional, construídos posteriormente ao estudo de cada solução de reforço. A argamassa de assentamento de cal aérea hidratada da marca Lusical foi produzida ao traço volumétrico 1:3 (cal:areia), sendo as areias de rio e areeiro utilizadas em partes iguais. Para a caracterização da argamassa em pasta foram extraídas amostras diárias, ao longo da construção dos muretes de referência, realizando-se o ensaio de consistência por espalhamento para cada uma das amostras, figura 3.5.

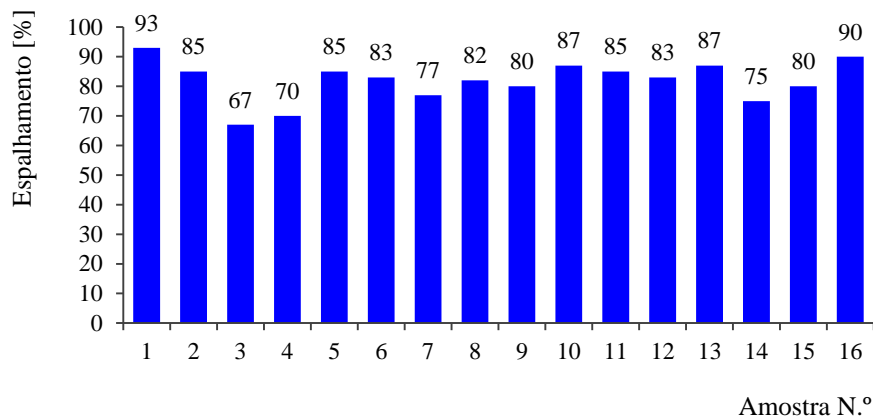


Figura 3.5 - Resultados do ensaio de espalhamento das argamassas de assentamento (Pinho, 2007)

Durante a construção dos muretes foram moldados mecanicamente provetes de várias dimensões, nomeadamente provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm (para determinação da massa volúmica, porosidade aberta, coeficiente de absorção de água por capilaridade e resistências mecânicas) e provetes cilíndricos de d=5cm e h=1,5cm ou 2,5cm (para determinação da aderência ao suporte). Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.23.

Tabela 3.23 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por F. Pinho (Pinho, 2007)

	Características estudadas	Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	2310	90
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,3	
	Resistência à compressão [MPa]	0,65	
	Tensão de aderência [Mpa]	0,15	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1742,9	
	Massa volúmica real [kg/m ³]	2590,1	
	Porosidade Aberta [%]	32,7	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ¹⁾	17,4	

¹⁾Ensaio realizado com provetes inteiros

Para o estudo realizado por C. Barreto (Barreto, 2010) [Tabela 3.18] foram ensaiados provetes de argamassas de cal aérea e bastardas, com o objectivo de avaliar o comportamento destas face à acção dos sais solúveis numa das soluções de reforço anteriormente desenvolvidas no trabalho de investigação realizado por F. Pinho (Pinho, 2007) no DEC – FCT/UNL.

Para a presente dissertação serviram de referência apenas os resultados obtidos nos provetes de argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3, nos quais foi utilizada cal aérea hidratada em pó da marca Lusical. Na amassadura dos provetes foram utilizadas areias de rio e de areeiro provenientes da cidade de Lisboa e da zona de Rio Maior, respectivamente.

No início da campanha experimental foram realizados ensaios de caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, nomeadamente a baridade e análise granulométrica. Na tabela 3.24 apresentam-se os principais resultados médios obtidos.

Tabela 3.24 – Caracterização física dos materiais utilizados nas argamassas estudadas por C. Barreto (Barreto, 2010)

Característica	Cal aérea	Areia de rio
Baridade [kg/m ³]	290,6	1393,2
Máxima dimensão do agregado [mm]	-	2,38
Mínima dimensão do agregado [mm]	-	0,149
Módulo de finura	-	2,5

As diferentes argamassas foram misturadas e compactadas em moldes prismáticos de 16cm×4cm×4cm. Antes da moldagem dos provetes, foi estabelecido um intervalo de espalhamento a variar entre os 60% e 80%. Após terem sido submetidos à cura, em ambiente seco com T=20±2°C e

Hr=65±5%, foi efectuada a caracterização das argamassas endurecidas, cujos resultados obtidos se apresentam na tabela 3.25.



Figura 3.6 – Provete prismático de 16cm×4cm×4cm estudado por C. Barreto (Barreto, 2010)

Tabela 3.25 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por C. Barreto (Barreto, 2010)

	Características estudadas	Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	3193	83
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,2	
	Resistência à compressão [MPa]	0,8	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1714,1	90
	Massa volúmica real [kg/m ³]	2593,7	
	Porosidade Aberta [%]	33,9	
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}] ¹⁾	12,14	
	Valor assintótico [kg/m ²] ¹⁾	15,13	

¹⁾Ensaio realizado com meios provetes (≈8cm×4cm×4cm)

O trabalho de investigação realizado por M. Veiga (Veiga, et al., 2004) [Tabela 3.18] consistiu, entre outros, numa campanha experimental onde foram estudadas argamassas de substituição, usualmente utilizadas em revestimentos.

Para a presente dissertação serviu de referência os valores obtidos na caracterização dos provetes de argamassa de cal aérea e areia ao traço volumétrico 1:3. Na tabela 3.26 apresentam-se os valores obtidos nos ensaios efectuados sobre as argamassas de substituição no seu estado endurecido.

Tabela 3.26 – Resultados médios dos ensaios de caracterização das argamassas de cal aérea e areia estudadas por M. Veiga (Veiga, et al., 2004)

	Características estudadas	Resultados obtidos	Idade [dias]
Mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico [MPa]	4400	90
	Resistência à tracção por flexão [MPa]	0,4	
	Resistência à compressão [MPa]	1,0	
Físicas	Massa volúmica aparente [kg/m ³]	1900	
	Coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m ² .h ^{1/2}]	19,2	

No estudo realizado por H. Böke (Böke, et al., 2006) [Tabela 3.18] foram determinadas algumas propriedades de argamassas de cal e tijolo e rebocos usados em edifícios destinados a banhos no império de Otomano⁴⁾. Foi também feita uma caracterização do pó de tijolo usado como agregado nos mesmos edifícios, o que permitiu entender melhor a relação entre as propriedades hidráulicas das argamassas testadas e dos agregados de tijolo.

Quanto às características das argamassas de cal e tijolo testadas, apenas os seguintes valores determinados serviram de referência:

- Os valores de porosidade que rondaram os 38%
- Os valores de resistência à compressão que foram superiores a 10MPa

O resultado obtido neste trabalho (Böke, et al., 2006), embora não tenham contribuído directamente para o enquadramento do trabalho experimental realizado, tendo em conta a diversificada composição dos agregados finos reciclados utilizados, poderão vir a servir de referência, tendo presente no entanto a existência de algumas diferenças.

3.4 – Síntese de resultados

Nesta secção são “recuperados” os principais resultados referidos no presente capítulo (Capítulo III) que vão servir de referência aos valores obtidos na presente dissertação (Capítulo IV), no que diz respeito à caracterização das argamassas estudadas: argamassa de cal aérea e agregado (Ca) e argamassa de cimento e agregado (Ci), ambas ao traço 1:4.

Nas tabelas 3.27, 3.28 apresentam-se os valores directamente comparáveis com os valores obtidos na campanha experimental do presente estudo.

⁴⁾O império Otomano foi um estado que existiu entre 1299 e 1922 e que no seu auge compreendia a Anatólia, o Médio Oriente, parte do norte de África e do sudeste europeu.

Tabela 3.27 - Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de **argamassa de cal aérea**

Autor	Material	Idade [dias]	Características físicas										Características mecânicas			
			Ba [kg/m ³]	D [mm]	d [mm]	MF	Esp [%]	Cac [kg/m ² .h ^{1/2}]	VA [kg/m ²]	MVR [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	PA [%]	Edin [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ader. [MPa]
P. Faria	Areia rio		1280	2,38	0,297	2,7										
	Cal aérea		570	x	x	x										
	Arg. em pasta						74									
	Arg. endur.	60						22,20	18,1	x	1720	34	2300	0,33	0,65	x
P. Faria; F. Henriques	Arg. em pasta						74									
	Arg. endur.	60						19,32	17,9	x	x	34	2300	0,35	0,65	x
V. Rato	Areia de rio		x	2,36	0,500	x										
	Cal aérea		x	x	x	x										
	Arg. em pasta						65									
	Arg. endur.	60						18,36	18,61 ³⁾	x	1705	34	1793	0,23	0,48	x
F. Pinho	Arg. em pasta						81									
	Arg. endur.	90						17,40	x	2590,1	1742,9	32,7	2310	0,3	0,65	0,15
C. Barreto	Areia de rio		1393,2	2,38	0,149	2,5										
	Cal aérea		290,6	x	x	x										
	Arg. em pasta						69									
	Arg. endur.	2)						12,14	15,13	2593,7	1714,1	33,9	3193	0,2	0,8	x
M. Veiga	Arg. em pasta						81									
	Arg. endur.	90						19,20	x	x	1900	x	4400	0,4	1,0	x

¹⁾ x - Ensaio não realizado;

²⁾ Ensaios realizados aos 90 e 83 dias de idade;

³⁾ Os valores de VA foram calculados com provetes inteiros;



 Ensaio não aplicável.

Tabela 3.28 – Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de **argamassa de cimento**

Autor	Material	Idade [dias]	Características físicas									Características mecânicas			
			Ba [kg/m³]	D [mm]	d [mm]	MF	Esp [%]	Cac [kg/m².h ^{1/2}]	VA [kg/m²]	MVR [kg/m³]	MVA [kg/m³]	E _{din} [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ader. [MPa]
S. Levy; H. Paulo	Arg. endur.	28						x	x	x	x	2500	0,2	5,3	x
L. Miranda	Material cerâmico		1270	4,8	x	1,27									
	Argam.		1320	0,55	x	0,74									
	Betão		1530	4,8	x	1,78									
	Arg. endur. E2	28						x	x	x	x	8000	1,75	7,39	x
	Arg. endur. E4	28						x	x	x	x	3500	1,11	3,71	x
	Arg. endur. E6	28						x	x	x	x	7000	1,74	7,44	x
C. Bavares co	Material cerâmico		2390	2,4	0,15	2,29									
	Betão		2600	2,4	0,15	3,03									
	Arg. endur. AGR-I	28						x	x	x	x	x	x	9,42	0,26 (a)
	Arg. endur. AGR-II	28						x	x	x	x	x	x	4,69	0,34 (a)
M. Braga	AFR		842	5	0,149										
	Cimento		1035												
	Arg. em pasta I(0-1:4)							70,8							
	Arg. endur.I(0-1:4)	28						9,84	x	x	1725,8	7110	1,36	3,91	0,33 (c)
C. Neno	AFR		842	4,76	0,149										
	Cimento		1035,4												
	Arg. em pasta 0%							76							
	Arga. em pasta 100%							70							
	Arg. endur. 0%	28						9,84	x	x	1725,8	7070	1,36	3,91	0,33 (a)
	Arg. endur. 100%	28						7,44	x	x	1569,5	x	2,15	7,38	x

¹⁾ x - Ensaio não realizado;

²⁾ Tipologia de rotura: (a) adesiva; (c) coesiva;

 Ensaio não aplicável.

3.5 – Propriedades físicas dos agregados finos reciclados

Nesta secção analisam-se algumas propriedades físicas dos agregados finos reciclados quando comparados com agregados naturais, nomeadamente a sua distribuição granulométrica, baridade e absorção de água por capilaridade, visando uma correcta análise das características e desempenho das argamassas em que forem usados.

Os agregados reciclados apresentam propriedades específicas de cada tipo, sendo que, quando comparados com argamassas convencionais, apresentam as principais diferenças (Lima, 1999):

- maior absorção dos grãos
- composição heterogénea
- menor resistência dos grãos

3.5.1 – Granulometria

O tipo de areias utilizado e a sua composição granulométrica têm grande influência nas argamassas, pelo que a sua escolha e proporção na mistura assume um papel importante na qualidade do produto final (Faria, 2004). A granulometria é uma propriedade específica de cada tipo em particular de agregado reciclado. Segundo J. Lima (Lima, 1999), esta varia conforme o tipo de resíduo processado, os equipamentos utilizados, a granulometria do resíduo antes de ser processado, entre outros. O autor (Lima, 1999) comenta ainda que, para um melhor controlo da granulometria, o agregado reciclado pode ser britado uma ou mais vezes consoante a dimensão pretendida, procurando obter curvas similares às da areia. No entanto e por razões económicas é desejável que se brite o material apenas uma vez.

V. Rato (2004), num estudo realizado sobre o desempenho de argamassas onde apenas foram considerados, enquanto factores de variação, a granulometria das areias e o tipo de ligante, verificou que as areias mais finas dão origem a argamassas mais porosas. À medida que aumenta a finura da areia, diminui o tamanho dos poros mas aumenta a quantidade de poros mais pequenos. L. Miranda e S. Selmo (Miranda, et al., 2001 e 2006), num estudo que analisou a influência da composição e teor de “entulho” em argamassas de revestimento, concluíram que o teor total de finos inferiores a 75µm mostrou ter influência na fissuração, independentemente do tipo de agregado reciclado. Os autores (Miranda, et al., 2001 e 2006) recomendam ainda que o teor de 25% dos finos totais não seja ultrapassado, podendo trazer consequências no desempenho das argamassas, mais concretamente problemas de fissuração.

3.5.2 – Baridade

A baridade dos agregados reciclados apresenta geralmente valores um pouco menores do que os apresentados pelos agregados naturais correntemente utilizados na produção de betões (Leite, 2001).

Segundo Hansen (Hansen, 1992) e citado por L. Evangelista (Evangelista, 2007), a principal justificação para tal fenómeno prendesse-se com o facto dos primeiros conterem argamassa que, por ser uma matéria mais porosa do que a rocha, diminui o valor das grandezas em jogo.

3.5.3 – Absorção de água

No que diz respeito a agregados convencionais, a taxa de absorção de água é uma propriedade de pouca influência, uma vez apresentarem pouca ou nenhuma porosidade (Leite, 2001). No entanto, aquando da sua substituição por agregados reciclados, esta apresenta-se como uma propriedade de bastante influência. Segundo L. Evangelista (Evangelista, 2007), com base em investigações realizadas, a absorção de água é a característica que mais difere entre os agregados naturais e reciclados; tal é consequência directa da existência de argamassa aderida às partículas recicladas, cuja estrutura é mais porosa do que a do material pétreo.

No entanto, C. Neno (Neno, 2010) refere que argamassas compostas por 100% de agregados reciclados apresentam menor absorção de água total, assim como menor taxa de absorção de água, sendo a velocidade de absorção de água inversamente proporcional à percentagem de agregados reciclados incorporados nas argamassas.

Capítulo IV

TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados na preparação das argamassas estudadas e descrevem-se os procedimentos de ensaio utilizados e resultados obtidos no decorrer da campanha experimental da presente dissertação, quer para os materiais constituintes das argamassas, quer para as argamassas propriamente ditas.

A maioria dos ensaios foi realizada nos laboratórios de construção do DEC – FCT/UNL, exceptuando os ensaios de determinação de três características físicas (absorção de água por capilaridade, massa volúmica e porosidade aberta) que foram realizados no laboratório de geologia do DEC – FCT/UNL.

Numa primeira fase faz-se a caracterização física dos principais constituintes das argamassas estudadas, em particular dos agregados finos reciclados. Em seguida, faz-se a caracterização física e mecânica das “argamassas tipo” estudadas.

A apresentação destas características é precedida da descrição do processo de recepção, triagem e valorização dos agregados finos reciclados, como forma de enquadrar o presente estudo experimental.

4.2 – Obtenção dos agregados finos reciclados

Nesta secção faz-se uma breve caracterização da empresa que forneceu os agregados finos reciclados utilizados na preparação das argamassas estudadas e descrevem-se as etapas principais do processo de recepção, triagem e valorização dos mesmos.

4.2.1 – Breve caracterização da empresa que forneceu os agregados finos reciclados

O sector de construção civil proporciona a produção de uma quantidade notável de resíduos indiferenciados, ou seja, resíduos de construção e demolição. No sentido de dar resposta a este tipo de problemáticas, a empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA, figura 4.1, antigo grupo LOBBE instalou, em 1989, a primeira unidade de triagem em Portugal, direccionada para a recepção e recuperação dos agregados provenientes do sector de construção civil.

A maioria dos resíduos, por razões económicas ou por escassez de legislação, tem como destino final aterros para “entulhos”. Porém, apesar de em reduzidas quantidades, já existe actualmente, uma

diversidade de empresas especializadas para trabalhos de recepção, tratamento e valorização de resíduos provenientes da actividade de construção.



Figura 4.1 – Vista geral das instalações da empresa SGR

4.2.1 – Breve descrição do processo

Em seguida, descrevem-se as actividades de recepção, triagem e valorização dos RCD tendo como base o procedimento de trabalho da empresa SGR:

Recepção

A recepção de resíduos é feita através da recolha, transporte e descarga em equipamento específico para o efeito, nomeadamente, contentores de 4 a 6 m³, consoante o volume de resíduos a recolher, bem como a localização do produtor, figura 4.2.

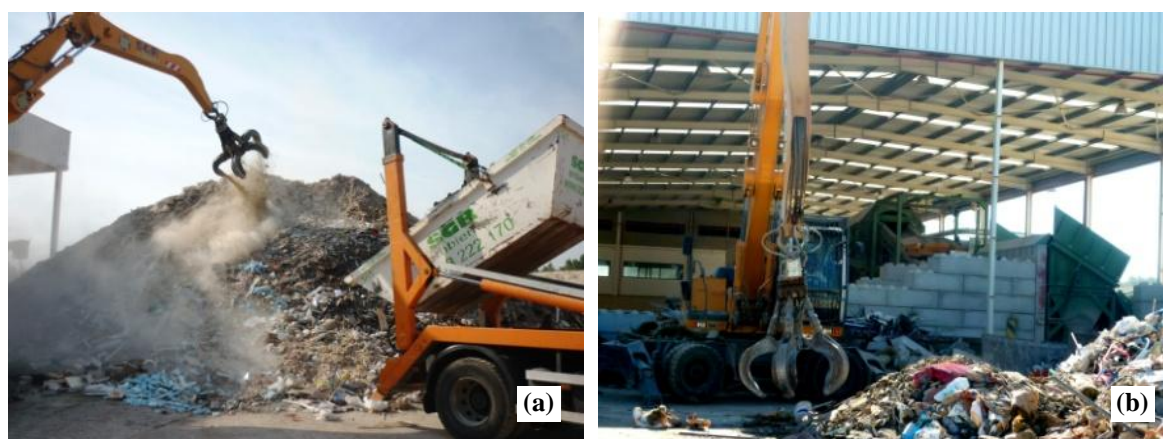


a – viatura para o transporte de resíduos; b – contentores (4 a 6 m³)

Figura 4.2 – Equipamento para recolha e transporte de resíduos

Na fase inicial de recepção o contentor é pesado e regista-se o peso líquido da carga. Ainda nesta fase é realizada uma inspecção visual da carga com respectiva classificação prévia da mesma.

Existem dois grupos genéricos de classificação dos RCD, o primeiro tem como base fileiras de RCD triados em obra, resíduos estes que correspondem a um determinado código LER e não têm qualquer tipo de mistura. O segundo grupo corresponde ao código LER 17 09 04, mistura de resíduos de construção e demolição, ou seja, diz respeito a uma mistura que requer triagem. Após pesagem dos contentores, os camiões deslocam-se à zona de pré-triagem, figura 4.3, onde os contentores são vazados e onde se confirma o código LER de carga correspondente.



a – local de descarga dos contentores; b – giratória equipada com grifa (triagem grosseira)

Figura 4.3 – Zona de pré- triagem dos RCD

Nesta zona e por acção de uma giratória equipada com grifa, procede-se à pré-triagem grosseira, que visa retirar os resíduos que possam prejudicar o bom funcionamento da linha de triagem, principalmente devido à sua dimensão. Os resíduos pré-triados são os seguintes:

- metais ferrosos e não ferrosos
- madeira
- agregados recicláveis
- agregados não recicláveis
- pedaços de grandes dimensões de betão com ferro ou sem ferro

Todos estes resíduos, conforme a sua tipologia, são encaminhados por fileiras para locais respectivos e destinos finais distintos. Após a sua pré-triagem e consequente classificação, procede-se à triagem.

Triagem

A triagem consiste na separação das fracções dos RCD consoante a sua natureza. Na figura 4.4 esquematiza-se as etapas do processo. Na figura 4.5 apresenta-se imagens recolhidas na empresa que mostram as principais fases do processo e em seguida descrevem-se essas fases.

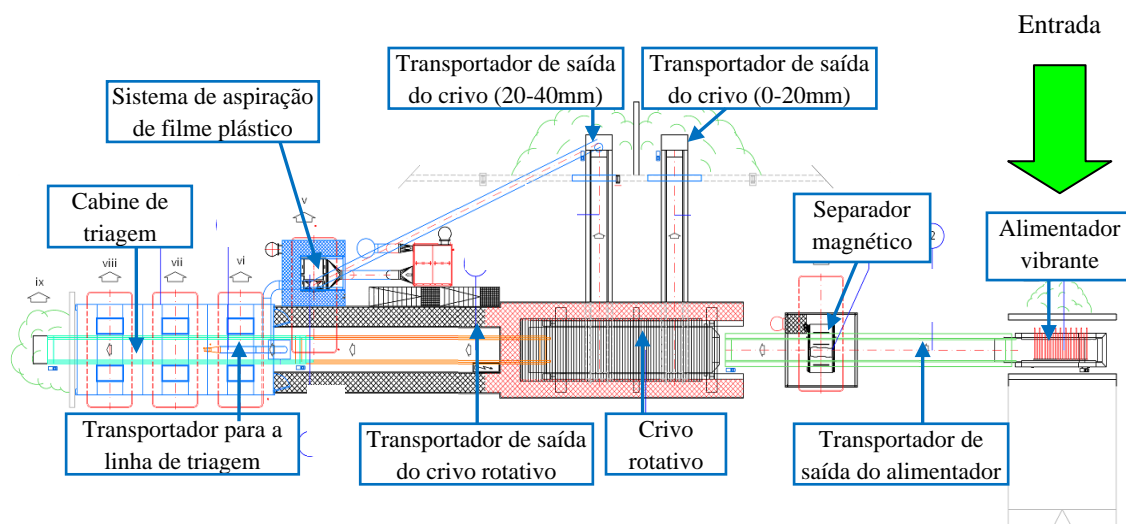


Figura 4.4 – Esquematização do processo de triagem dos RCD



a – alimentador vibrante; b – separador magnético; c – crivo rotativo; d – interior do crivo rotativo; e – transportadores de saída do crivo rotativo; f – cabine de triagem.

Figura 4.5 – Processo de triagem dos RCD

Na unidade de triagem a pá carregadora deposita o material pré-triado sobre o primeiro equipamento da linha de triagem, o alimentador vibrante [fig. 4.5 (a)]. Esta máquina para além de dosear o material que segue para o transportador de saída, está incorporado com uma grelha que impede a entrada de elementos demasiado volumosos.

À saída do alimentador vibrante, o material, devidamente doseado, sobe através de um transportador inclinado, que por sua vez é interceptado por um separador magnético [fig. 4.5 (b)], cuja finalidade consiste em recolher todos os materiais ferrosos misturados com o material.

De seguida o material entra num crivo rotativo [fig. 4.5 (d)], perfurado com malha de duas dimensões distintas, até metade do seu comprimento é composto por grelhas com perfurações até 20mm e na segunda metade por grelhas com perfurações até 40mm. Ambas as fracções finas separadas no crivo rotativo caem por gravidade nos transportadores de saída [fig. 4.5 (e)] sendo encaminhadas até à parte exterior da unidade, onde ficam depositadas até posterior valorização.

A restante fracção grosseira que sai do crivo rotativo é recolhida pelo transportador que posteriormente atravessa a cabine de triagem [fig. 4.5 (f)], onde manualmente são separados materiais como madeiras, agregados recicláveis, materiais ferrosos e não ferrosos, etc. Após triagem o material restante a ser recolhido cai num contentor aberto situado no pano inferior, finalizando assim o processo de triagem a que o material está sujeito. Por fim, procede-se à valorização dos resíduos inicialmente misturados.

Valorização

Na fase de valorização os resíduos, correctamente separados, dão origem a fileiras triadas de diferentes materiais, aos quais é atribuído o seguinte destino:

Tabela 4.1 – Processo de valorização dos RCD¹⁾

Resíduo triado	Produto final
Agregados	Agregados reciclados com três granulometrias
Agregados	Betão britado
Madeira	Estilha
Metais ferrosos e não ferrosos	Metais compactados ou a granel

¹⁾Adaptado de tabela fornecida pela empresa SGR

4.3 – Materiais utilizados na preparação das argamassas

Na presente campanha experimental foram moldados provetes de argamassas de diferentes constituições para cada tipo de agregado: cal aérea e agregado; cimento e agregado.

Nas duas argamassas foram utilizados dois tipos de agregados: agregado fino normalizado e agregado fino reciclado (fracções entre 0-20mm).

Seguidamente são identificados os materiais utilizados na amassadura dos provetes das argamassas.

4.3.1 – Agregados

Na amassadura dos provetes foram utilizados agregados finos reciclados e agregados finos normalizados na obtenção dos provetes de referência. O agregado normalizado foi disponibilizado pela empresa SECIL, figura 4.6, o agregado fino reciclado foi recolhido das instalações de recepção, tratamento e expedição de RCD da empresa SGR.



Figura 4.6 – Agregado fino normalizado ($m=1350\pm 5g$)

Segundo J. Brito (Brito, 2005), embora seja possível comparar agregados reciclados com agregados pétreos (naturais) provenientes de uma determinada pedreira e/ou areeiro, dessa comparação não é possível retirar conclusões susceptíveis de serem generalizadas para outras composições de agregados reciclados. Com o objectivo de reduzir variáveis como a composição e origem dos agregados reciclados, o material foi recolhido de três zonas distintas do “monte” de depósito de agregado, figura 4.7.



a – amostra proveniente da base do “monte” de agregado fino reciclado;

b – amostra proveniente do topo do “monte de agregado reciclado;

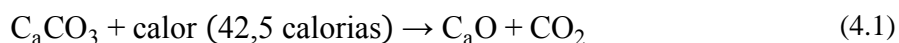
c – amostra proveniente do topo do “monte” de agregado reciclado junto ao transportador de saída.

Figura 4.7 – Local de recolha do agregado fino reciclado

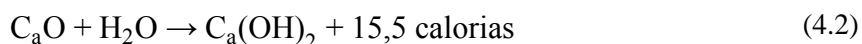
4.3.2 – Ligantes

Na preparação dos provetes de argamassa estudados foram utilizados dois tipos de ligante: cal aérea hidratada em pó da marca Lusical [fig.4.8 (a)] e cimento Portland composto CEM II/B-L 32,5 da marca Secil [fig.4.8 (b)], constituído maioritariamente por clínquer (65 a 79%), calcário (21 a 35%) e outros constituintes (0 a 5%) [52].

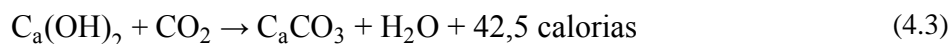
A cal aérea resulta da decomposição, pela acção da temperatura, de uma rocha com percentagem não inferior a 95% de carbonato de cálcio, ou de cálcio e magnésio. O produto obtido pela cozedura destes calcários, a 894°C, designa-se por “cal viva” (óxido de cálcio), de acordo com a seguinte reacção química (calcinação) (Coutinho, 1997):



Antes de ser aplicada, procede-se à extinção da “cal viva” por imersão ou aspersão com a água, dando origem à “cal apagada”, de acordo com a seguinte reacção química (Coutinho, 1997):



Após a sua aplicação, dá-se o seu endurecimento por carbonatação, quando o hidróxido de cálcio reage com o dióxido de carbono da atmosfera, dando origem a carbonato de cálcio ou calcite, de acordo com a seguinte reacção química (Coutinho, 1997):



As argamassas de cal aérea e areia apresentam resistências mecânicas pouco elevadas, baixos módulo de elasticidade e aderência ao suporte. No entanto, permitem que as argamassas tenham maiores deformações, sem fissuração (Coelho, et al., 2009).

O cimento Portland artificial é obtido a partir de uma mistura de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e outra ou outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro, reduzida a pó muito fino. Após este processo, a mistura é homogeneizada, quer a seco (via seca) quer por meio de água (via húmida) (Coutinho, 1997).

A mistura das matérias-primas é feita tendo em conta que, depois de perder água e dióxido de carbono, devido às elevadas temperaturas atingidas no forno, tenha uma composição química dentro dos limites seguintes (Coutinho, 1997):

- óxido de cálcio (CaO) – 60 a 68%
- dióxido de enxofre (SiO_2) – 17 a 25%
- trióxido de alumínio (Al_2O_3) – 2 a 9%
- trióxido de ferro (Fe_2O_3) – 0,5 a 6%

Durante a cozedura, à temperatura da ordem dos 1450°C , as matérias-primas reagem entre si, formando novos compostos (clinkerização). Através de processos químicos e físicos, os produtos da reacção, ao arrefecerem, aglomeram-se em pedaços com dimensões variáveis, aos quais se denomina de clínquer. À saída do forno o clínquer deve ser arrefecido rapidamente devido à instabilidade da estrutura do silicato tricálcico a temperaturas inferior a 1250°C (Coutinho, 1997).

Após arrefecimento, o clínquer é moído em moinhos de bolas, juntamente com adjuvantes, para facilitar a moagem, aditivos reguladores do tempo de presa (gesso), e outros para lhe modificar as propriedades, que levam à formação dos principais componentes do cimento Portland (Coutinho, 1997):

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$) – 20 a 65%
- Silicato bicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$) – 10 a 55%
- Aluminato tricálcico ($2\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) – 0 a 15%
- Aluminoferrato tetracálcico ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) – 5 a 15%



a – cal aérea; b – cimento

Figura 4.8 – Ligantes utilizados na preparação das argamassas

4.3.5 – Água

Na execução dos provetes de argamassa foi utilizada água da rede pública de abastecimento da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, FCT/UNL, sendo a quantidade adicionada à mistura função da trabalhabilidade pretendida.

4.4 – Ensaios de caracterização física dos constituintes das argamassas

Foram realizados ensaios de determinação da análise granulométrica e baridade dos agregados (fino normalizado e fino reciclado) e ligantes (cal aérea e cimento).

No Anexo I da presente dissertação apresentam-se os resultados médios e os respectivos desvios padrão obtidos em cada provete de argamassa ensaiado.

4.4.1 – Análise granulométrica dos agregados

O ensaio de determinação da análise granulométrica foi efectuado sobre o agregado fino reciclado e agregado fino normalizado utilizados na preparação das argamassas.

A granulometria corresponde à distribuição das percentagens das partículas de determinadas dimensões que compõem o agregado (Coutinho, 1997).

Agregados finos reciclados

Este ensaio consiste em fazer passar a amostra de agregado fino reciclado através de 9 peneiros da série principal ASTM e um da série secundária (peneiro ½”), posicionados de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão da abertura das malhas, progredindo geometricamente segundo a razão 2.

Neste ensaio obtém-se:

- a curva granulométrica do agregado, que corresponde à percentagem em peso que cada fracção possui em relação à massa total
- a máxima dimensão do agregado (D), que corresponde á menor abertura da malha do peneiro do qual passa uma quantidade de agregado superior ou igual a 90%
- a mínima dimensão do agregado (d), que corresponde à maior abertura da malha do peneiro da série através do qual passa uma quantidade de agregado inferior ou igual a 5%
- o módulo de finura (MF), que corresponde à soma das %’s retidas acumuladas em cada peneiro da série principal dividida por 100

No final do ensaio, a soma dos resíduos nos peneiros deverá ser igual à massa inicial da amostra, com uma tolerância de 1%.

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com a norma NP EN 933:1-2000 (IPQ, 2000). De seguida apresentam-se o procedimento e os equipamentos usados no ensaio de determinação da análise granulométrica do agregado fino reciclado (IPQ, 2000), figura 4.9.

Equipamentos:

- pá
- balança de precisão 0,1g
- estufa ventilada

-
- peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 19,1mm ($\frac{3}{4}$ "), 12,7mm ($\frac{1}{2}$ "), 9,51mm ($\frac{3}{8}$ "), 4,76mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100) e de 0,075mm (n.º200)
 - agitador mecânico de peneiros

Procedimento experimental:

- secar a amostra na estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ até massa constante
- esquartelar o material em quatro partes iguais para redução do tamanho da amostra
- pesar 2000g de agregado fino reciclado, em função da capacidade dos peneiros
- colocação da amostra de agregado no interior do peneiro superior do 1º agrupamento de peneiros, dispostos de modo que a abertura das malhas diminua de cima para baixo
- colocação da amostra de agregado no interior do peneiro superior do 2º agrupamento de peneiros, dispostos de modo que a abertura das malhas diminua de cima para baixo
- peneirar mecanicamente o agregado durante 15min
- após peneiração registar a massa retida em cada peneiro, incluindo o recipiente de fundo (refugo) e calcular as percentagens relativas à massa inicial

Nota: O tempo utilizado durante agitação mecânica (15min) deveu-se à composição grosseira do agregado fino reciclado.

Relativamente à fase de peneiração do agregado fino reciclado, devido à capacidade limitada de 7 peneiros simultâneos do equipamento de agitação, o conjunto foi agrupado em 2 conjuntos (7+3), o primeiro constituído pelos peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 19,1mm ($\frac{3}{4}$ "), 12,7mm ($\frac{1}{2}$ "), 9,51mm ($\frac{3}{8}$ "), 4,76mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30) e o segundo constituído pelos peneiros 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100) e 0,075mm (n.º200).

Agregados finos normalizados

A metodologia de ensaio realizou-se com base nas regras estipuladas pela norma NP EN 933-1:2000 (IPQ, 2000). De seguida apresenta-se o procedimento e os equipamentos usados no ensaio de determinação da análise granulométrica do agregado fino normalizado (IPQ, 2000), figura 4.9.

Equipamentos:

- os referidos em relação ao agregado fino reciclado com excepção dos peneiros, que neste caso foram utilizados peneiros ASTM com abertura da malha quadrada de 4,76mm (n.º4), 2,38mm (n.º8), 1,19mm (n.º16), 0,595mm (n.º30), 0,297mm (n.º50), 0,149mm (n.º100), 0,075mm (n.º200)

Procedimento experimental:

- o referido em relação ao agregado fino reciclado com exceção da quantidade da amostra utilizada, que neste caso foi de 1000g e do tempo de peneiração, que neste caso foi de 10min



a – estufa ventilada; b – balança de precisão 0,1g; c – agitador mecânico e peneiros ASTM

Figura 4.9 – Equipamentos utilizados no ensaio de determinação da análise granulométrica

As curvas granulométricas e as características dos dois agregados utilizados na preparação das argamassas encontram-se, respectivamente, na figura 4.10 e na tabela 4.2, a seguir representadas. Os resultados obtidos nas três amostras ensaiadas de cada agregado encontram-se nas tabelas I.1 a I.4 e figuras I.1 a I.4 no Anexo I. No Anexo II apresenta-se um conjunto de características do agregado fino reciclado fornecidas pela empresa SGR.

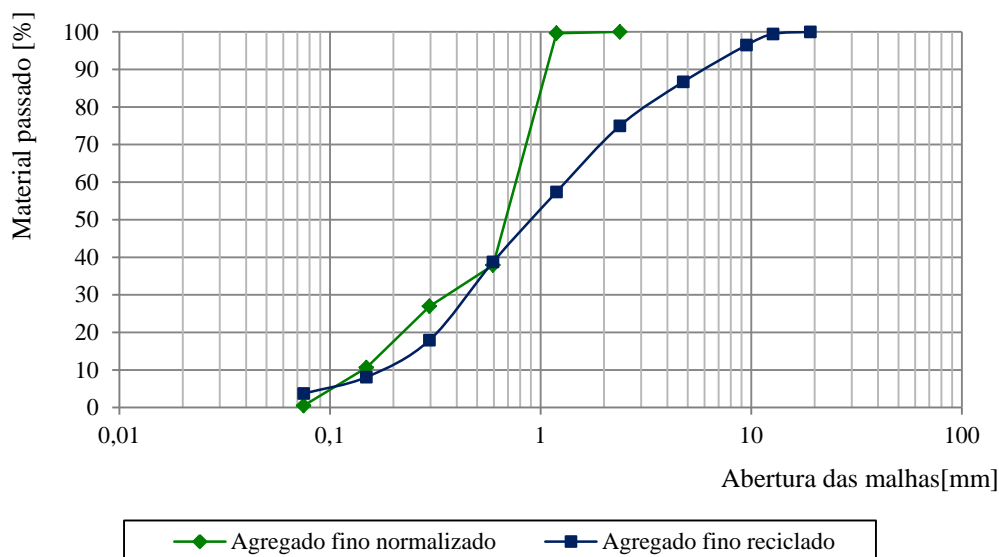


Figura 4.10 – Curvas granulométricas do agregado fino reciclado e do agregado fino normalizado

Tabela 4.1 – Características físicas dos agregados

Material	Módulo de finura	Máxima dimensão do agregado [mm]	Mínima dimensão do agregado [mm]
Agregado fino reciclado	3,2	12,7	0,075
Agregado fino normalizado	2,2	1,19	0,149

4.4.2 – Determinação da baridade dos agregados e ligantes

A baridade é definida como a relação entre a massa de uma quantidade de agregado e o volume ocupado pelo mesmo, incluindo os espaços de ar entre as partículas. A determinação da baridade (Ba) é feita de acordo com a expressão:

$$Ba = \frac{M}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.4)$$

Sendo M a massa do recipiente preenchido com o material (descontando a massa do recipiente) em kg e V o volume do recipiente em m³.

A baridade de um agregado depende do volume de vazios, sendo este variável, na medida em que varia de acordo com o grau de compactação. Por outro lado, a baridade depende também do teor de humidade da areia, uma vez que a quantidade absorvida na superfície das partículas condiciona o grau de compactação (Coutinho, 1997).

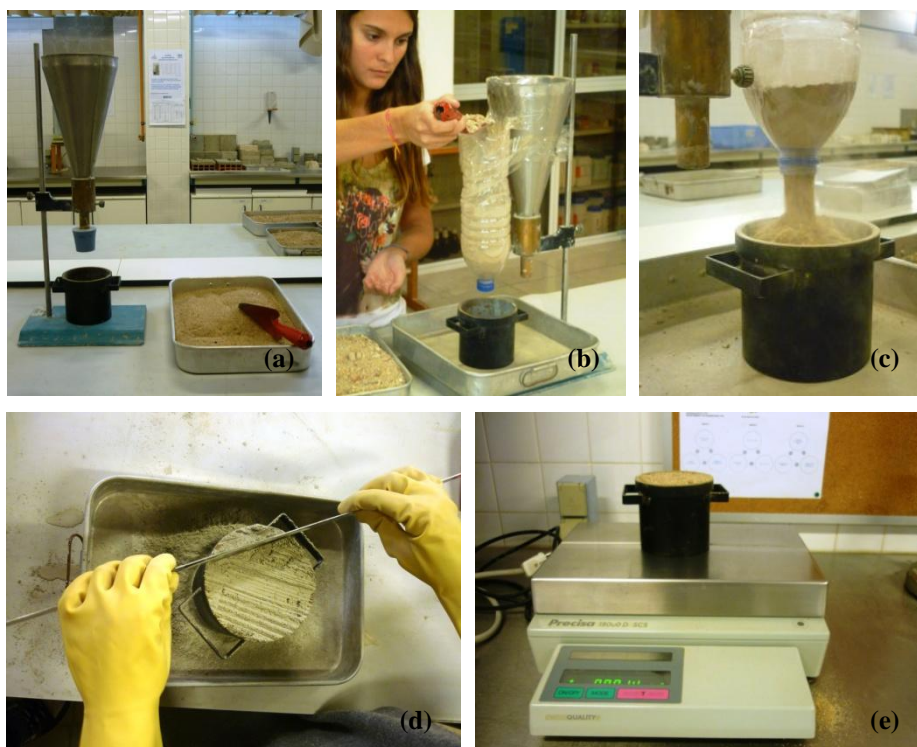
Ambos os agregados foram submetidos ao ensaio da determinação da baridade, bem como os ligantes utilizados na preparação das argamassas, tendo como referência a ficha de ensaio Fe 15 (UNL/FCT, 1996) e o trabalho de investigação desenvolvido por V. Rato (Rato, 2006) no DEC-FCT/UNL [por sua vez baseada na norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ,2002)]. Os cálculos dos valores da baridade foram realizados para converter o traço volumétrico (volume) em traço ponderado (peso), necessário ao balanço da quantidade necessária de ligantes e agregados utilizados. De seguida apresenta-se o procedimento e os equipamentos usados no ensaio de determinação da baridade dos agregados e ligantes (UNL/FCT, 1996; Rato, 2006; IPQ, 2002), figura 4.11.

Equipamentos:

- estufa ventilada
- balança de precisão de 0,1g
- recipiente metálico cilíndrico
- funil metálico em suporte de altura regulável
- régua metálica

Procedimento experimental:

- pesagem do recipiente metálico vazio e limpo
- colocação do material (agregado ou ligante) no recipiente através do funil; o recipiente foi colocado a uma distância entre o seu aro superior e o bordo inferior do funil de 50mm, para garantir que a altura de queda dos materiais não seja variável, assegurando assim uma igual compactação
- remoção do material excedente com uma régua metálica
- pesagem na balança, do recipiente preenchido (M), tendo-se inicialmente registado a sua tara



a – material e equipamento; b e c – passagem do material para o recipiente através da garrafa de água de 1 litro; c – nivelamento da superfície com a ajuda da régua (ligante); d – pesagem do recipiente cheio de material

Figura 4.11 – Ensaio de determinação da baridade

Nota: O procedimento adoptado, relativamente à norma NP EN 1097-3:2002 (IPQ, 2002), difere essencialmente no equipamento utilizado na determinação da baridade do agregado reciclado. Devido às dimensões das partículas, em alternativa ao funil metálico, foi utilizada uma garrafa de água de um litro cortada no topo, em suporte de altura regulável. Com a utilização deste dispositivo alternativo, foi possível a passagem de partículas mais grossas para o recipiente, a uma altura de 50mm entre o topo da garrafa e o aro superior do recipiente metálico.

É também de notar que os materiais foram inicialmente submetidos à secagem em estufa ventilada $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ para não haver segregação das partículas.

O material foi esquadrelado em quatro partes iguais, antes da passagem para o funil, para redução do tamanho da amostra.

Os resultados médios das nove amostras de agregado reciclado, da areia normalizada e ligante encontram-se representados nas figuras 4.12 e 4.13. Os valores de baridade obtidos em cada amostra encontram-se na tabela I.5 no Anexo I.

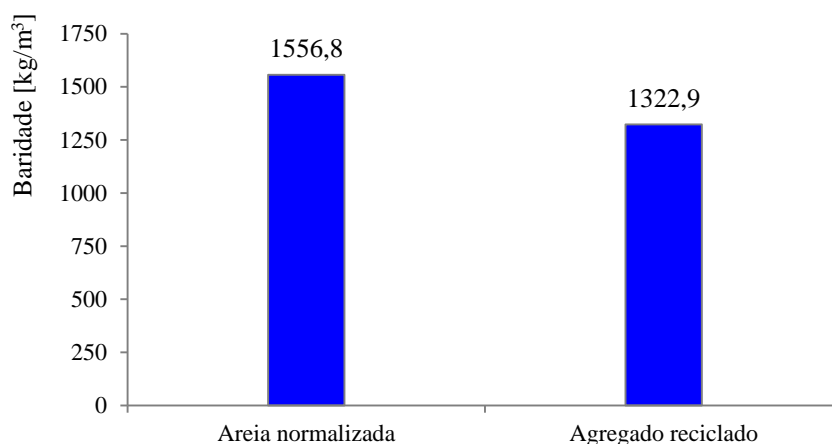


Figura 4.12 – Baridade dos agregados utilizados na preparação das argamassas

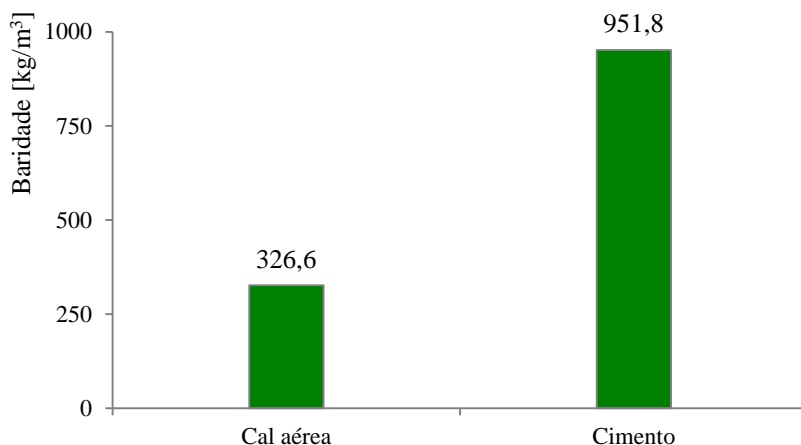


Figura 4.13 – Baridade dos ligantes utilizados na preparação das argamassas

4.5 – Preparação dos provetes de argamassa (amassadura)

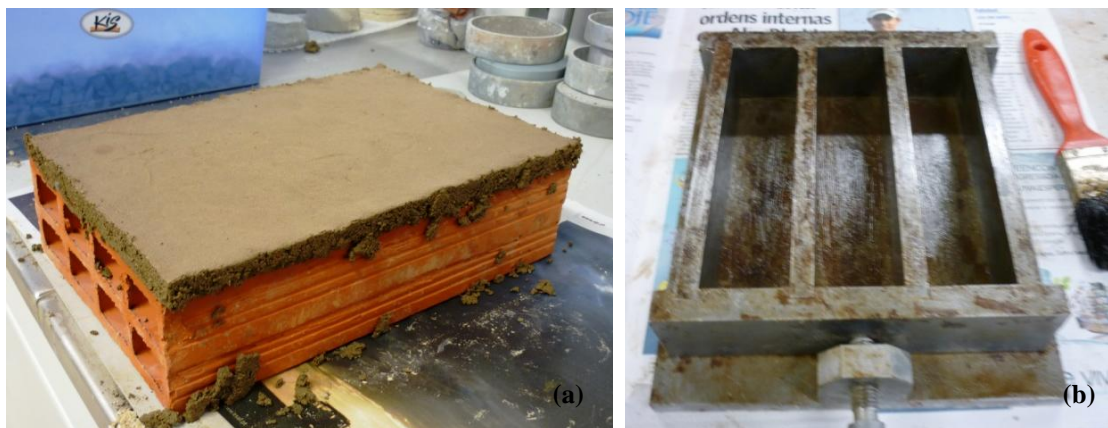
Na campanha experimental, tal como referido na secção 4.3, definiu-se um total de duas argamassas a ensaiar de constituintes diferentes: cal aérea e agregado e cimento e agregado.

No que diz respeito ao traço adoptou-se, para todas as argamassas, um traço volumétrico 1:4 (ligante:agregado), sendo o agregado fino normalizado e fino reciclado utilizados em igual proporção.

Para além de ser um traço usualmente utilizado em argamassas de cimento, comparativamente ao traço 1:3, pode apresentar, para a mesma trabalhabilidade uma maior economia de ligante, evitando alguma retracção que possa advir do excesso de ligante (Neno, 2010).

Foram moldados 28 provetes, para caracterizar a argamassa endurecida, distribuídos da seguinte forma:

- 4 provetes rectangulares constituídos por uma camada de argamassa de 30cmx20cmx1,5cm, para realização dos ensaios de aderência ao suporte (material cerâmico), figura 4.14 (a)
- 24 provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm, com recurso a moldes metálicos, semelhantes aos representados na figura 4.14 (b), para realização de vários ensaios, nomeadamente a determinação do módulo de elasticidade dinâmico, resistências mecânicas, absorção de água por capilaridade, massa volúmica e porosidade aberta



a – provetes rectangulares de 30cm×20cm×1,5cm; b – provetes prismáticos de 16cm×4cm×4cm

Figura 4.14 – Moldes utilizados na execução dos provetes de argamassa

Relativamente à preparação das argamassas, estas foram executadas de acordo com a ficha de ensaio Fe 19 (UNL/FCT, 1996). Tendo em conta diferentes fontes bibliográficas (Faria, 2004; Rato, 2006; Barreto, 2010), considerou-se para esta dissertação um espalhamento entre 60 e 80%.

De seguida apresenta-se os equipamentos de ensaio e procedimento seguido na realização da amassadura dos provetes das argamassas tipo (UNL/FCT, 1996), figura 4.15.

Equipamentos:

- misturador mecânico de argamassas
- cronómetro
- balança de precisão de 0,01g
- proveta graduada

Procedimento de ensaio:

- pesagem de cada constituinte da argamassa
- homogeneização manual dos constituintes secos e posterior colocação na cuba
- medição da quantidade de água necessária a adicionar à mistura, através de uma proveta graduada
- entrada em funcionamento do misturador mecânico (com contagem de tempo de 45s), adicionando simultaneamente a quantidade de água previamente determinada no ensaio de espalhamento (factor a/l)
- paragem do aparelho para limpeza dos bordos da cuba durante um intervalo de 30s
- nova amassadura mecânica, durante mais 60s



a,b – misturador mecânico; c – colocação da quantidade de água previamente determinada

Figura 4.15 – Preparação das argamassas em pasta

Partindo do volume de referência pretendido para os agregados, necessário para preencher seis provetes prismáticos de $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ (1536cm^3) e para realizar dois ensaios de aderência ao suporte (1200cm^3), e fazendo corresponder esse volume ao traço volumétrico pretendido (1:4), obteve-se o volume de referência dos ligantes a utilizar (700cm^3). Posteriormente, para obtenção das massas de referência de cada constituinte, multiplicou-se o volume de referência pela baridade correspondente. Para a determinação da quantidade de água necessária, realizou-se uma amassadura prévia para cada argamassa tipo, mantendo a consistência pretendida.

4.6 – Ensaios às argamassas no seu estado fresco e condições de cura

Após a caracterização dos constituintes das argamassas, realizam-se ensaios às argamassas no seu estado fresco.

4.6.1 – Consistência por espalhamento

Sobre as argamassas no seu estado fresco foi realizado o ensaio de consistência por espalhamento, segundo as indicações da norma EN 1015-3:1999 (IPQ, 1999), para definir a quantidade de água a adicionar à mistura com base num espalhamento pré definido.

Para chegar à consistência desejada das argamassas realizaram-se vários ensaios de consistência por espalhamento, com os seguintes equipamentos e procedimento de ensaio a seguir enunciados (IPQ, 1999), figura 4.16.

Equipamentos:

- mesa de consistência
- molde tronco-cônico
- craveira analógica
- varão metálico de compactação, com 15mm de diâmetro
- régua metálica

Procedimento experimental:

- verificação do estado de secagem e limpeza do equipamento
- colocação do molde no centro da mesa de consistência
- enchimento do molde em duas camadas de altura sensivelmente iguais
- compactação com o varão (20 pancadas em cada camada), mantendo o molde fixo na mesa de consistência
- nivelamento da superfície, retirando-se o molde com cuidado
- rotação da manivela, provocando 15 pancadas em 15s
- medição com a craveira, segundo os quatro diâmetros gravados no tampo da mesa, do afastamento entre dois pontos de intersecção de cada um deles com o contorno da argamassa, após o espalhamento provocado pelas 15 pancadas
- cálculo da média das quatro medições, d, arredondada à unidade



a – molde tronco-cónico; b – argamassa no molde após compactação; c – nivelamento da superfície;
d – remoção do molde; e – aspecto final da argamassa e medição com a craveira

Figura 4.16 – Ensaio de consistência por espalhamento das argamassas no seu estado fresco

O valor de espalhamento (Esp) arredondado à unidade é dado de acordo com a seguinte expressão (IPQ, 1999):

$$\text{Esp} = \left(\frac{d-10}{10} \right) \times 100 \text{ [\%]} \quad (4.5)$$

Sendo d a média dos quatro valores d' [cm]; 10 o diâmetro interior da base do molde tronco-cónico [cm].

Na tabela 4.3 apresentam-se os valores obtidos nas diferentes amassaduras efectuadas, assim como a razão água/ligante a elas associada.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de consistência por espalhamento

Argamassa ¹⁾	Razão a/l	Água necessária por dm ³ de argamassa [ml]	Espalhamento [%]
RCi	1,16	220	72,0
NCi	0,94	178	68,8
RCa	3,96	259	78,5
NCa	3,49	230	77,3

¹⁾RCi: argamassa de cimento e agregado fino reciclado; NCi: argamassa de cimento e agregado fino normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado fino reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado fino normalizado

Após a realização do ensaio de consistência por espalhamento procedeu-se ao enchimento dos moldes dos provetes, de acordo com a Fe 19 (UNL/FCT, 1996). A moldagem dos provetes decorreu durante o dia 10 de Março de 2011, de acordo com o equipamento e procedimento seguidamente apresentados (UNL/FCT, 1996), figura 4.17.

Equipamentos:

- compactador mecânico
- moldes prismáticos de 4cmx4cmx16cm

Procedimento experimental:

- colocação do molde bem fixo na mesa do compactador mecânico
- enchimento do molde em duas camadas de alturas sensivelmente iguais
- compactação de cada camada com vinte pancadas
- remoção do excesso de argamassa



a – enchimento do molde; b – compactação de cada camada; c – moldes preenchidos

Figura 4.17 – Moldagem e compactação mecânica dos provetes de 16cmx4cmx4cm

Após a moldagem dos provetes, estes foram colocados numa sala de ambiente condicionado onde ocorreu a cura, com as seguintes condições: temperatura de $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de $60\pm 5\%$.

Após um período de sete dias, os provetes foram desmoldados, permanecendo na sala de cura, mantendo as mesmas condições a que estavam expostos.

Os provetes desmoldados foram colocados numa estante e cada um deles sobre suportes de poliestireno, para promover o contacto da face inferior dos mesmos com o ambiente de cura, figura 4.18.



Figura 4.18 – Provetes prismáticos de 16cmx4cmx4cm desmoldados em ambiente de cura

4.7 – Ensaios de caracterização das argamassas endurecidas

Na tabela 4.4 referem-se os ensaios de caracterização, física e mecânica, realizados sobre as argamassas no seu estado fresco, bem com as normas e/ou fichas de ensaio usadas.

Tabela 4.4 – Características estudadas nas argamassas endurecidas

Características estudadas		Norma e/ou ficha de ensaio
Características mecânicas	Módulo de elasticidade dinâmico	Fe 08 (FCT/UNL, 1996)
	Resistência à tracção por flexão	EN 1015 – 11:1999 (CEN, 1999) / Fe 27 (FCT/UNL, 1999)
	Resistência à compressão	EN 1015 – 11:1999 (CEN, 1999) / Fe 27 (FCT/UNL, 1999)
	Aderência ao suporte	EN 1015 – 12:1999 (CEN, 1999) / Fe 21 (FCT/UNL, 1996)
Características físicas	Absorção de água por capilaridade	Fe 06 (FCT/UNL, 1999)
	Massa volúmica real	Fe 01 (FCT/UNL, 1996)
	Massa volúmica aparente	Fe 01 (FCT/UNL, 1996)
	Porosidade aberta	Fe 02 (FCT/UNL, 1996)

Os resultados individuais e os respectivos desvios padrão encontram-se no Anexo I, relativamente à caracterização da argamassa endurecida.

4.7.1 – Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas permite perceber a sua susceptibilidade à fendilhação (compatibilidade física com o suporte), ao nível da sua deformabilidade. Valores de módulo de elasticidade elevados correspondem a materiais mais rígidos e valores baixos correspondem a materiais com elevada deformabilidade. Este ensaio consiste na medição, através de um aparelho de medição de frequências fundamentais [fig. 4.19 (a)], da frequência de ressonância longitudinal do provete de ensaio, que corresponde à frequência mais baixa para a qual se obtém uma amplitude máxima.

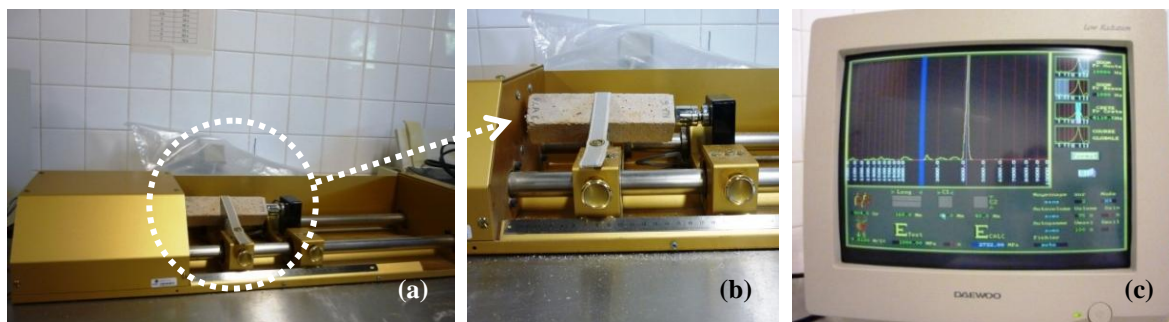
O ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi realizado com base na ficha de ensaio Fe 08 (UNL/FCT, 1996). Neste ensaio foram utilizados provetes inteiros, antes de serem ensaiados à tracção por flexão e à compressão. De seguida indicam-se os equipamentos e procedimento de ensaio utilizados na determinação do módulo de elasticidade dos provetes de ensaio (UNL/FCT, 1996), figura 4.19.

Equipamento:

- estufa ventilada
- balança com precisão 0,1g
- equipamento adequado para emissão de vibrações e registo da frequência de ressonância longitudinal correspondente

Procedimento experimental:

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ até obter massa constante
- colocação de cada provete no equipamento, aplicando numa extremidade uma fonte emissora e, na outra, a unidade de recepção
- ligação do oscilador de frequência variável que alimenta o vibrador, com registo das amplitudes das vibrações, correspondendo as condições de ressonância às amplitudes máximas



a,b – equipamento para a determinação do E_{din} ; e – equipamento informático de processamento de dados

Figura 4.19 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico

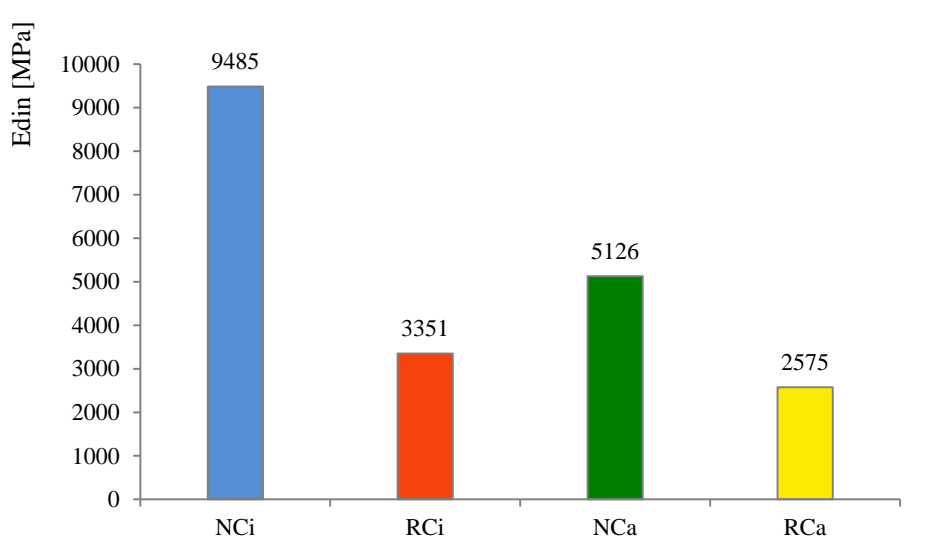
O módulo de elasticidade dinâmico é automaticamente calculado pelo programa informático que processa os dados recebidos do equipamento, através da expressão (UNL/FCT, 1996):

$$E_{dn} = (2 \times L \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \text{ [MPa]} \quad (4.6)$$

Sendo L o comprimento do provete [m]; f_0 a frequência de ressonância longitudinal [Hz]; ρ a massa volúmica [N/m^3]; g a aceleração da gravidade ($9,81\text{m/s}^2$).

Devem ser efectuadas, no mínimo, duas determinações para cada um dos provetes, colocando o provete em diferentes posições, as quais não devem diferir mais do que 5%. A frequência longitudinal final de cada um dos provetes é dada pela média das duas determinações.

Na figura 4.20 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade aos 28 e aos 90 dias. Os resultados individuais obtidos nas argamassas ensaiadas encontram-se nas tabelas I.7, I.8 e I.9 no Anexo I.



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCI: argamassa de cimento e agregado reciclado;

NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

Figura 4.20 – Resultados médios do módulo de elasticidade dinâmico

Ao analisar a figura 4.20, verifica-se que o valor dos provetes de argamassa contendo agregados finos reciclados (RCi e RCa), para ambas as argamassas tipo (de cimento e cal aérea), manteve-se inferior ao dos provetes de argamassa contendo agregados finos normalizados (NCi e NCa).

4.7.2 – Resistências mecânicas à tracção por flexão e à compressão

As resistências mecânicas são parâmetros relevantes na caracterização das argamassas pois permitem determinar a sua capacidade resistente. No que diz respeito à caracterização de uma argamassa de revestimento, de assentamento ou outra, eles devem ser tidos em conta no respectivo processo de selecção.

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com a norma EN 1015-11:1999 (CEN, 1999) e com a ficha de ensaio Fe 27 (UNL/FCT, 1999). De seguida indica-se os equipamentos e respectivo procedimento de ensaio (CEN, 1999; UNL/FCT, 1999), figura 4.21.

Equipamentos:

- estufa ventilada
- máquina universal de tracção (Zwick)
- suporte para ensaio de flexão
- suporte para ensaio de compressão

Procedimento experimental (determinação da resistência à tracção por flexão):

- após terem sido submetidos às condições de cura, os provetes são postos a secar em estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante
- colocação dos provetes prismáticos sobre o suporte para o ensaio de flexão, cujos pontos de apoio devem estar afastados de 10mm e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento
- aplicação da carga a meio vão, com uma velocidade de 5,1mm/min ($50\pm10\text{N/s}$), até à rotura, registando-se o valor da carga última ao qual resistem os provetes – F_f

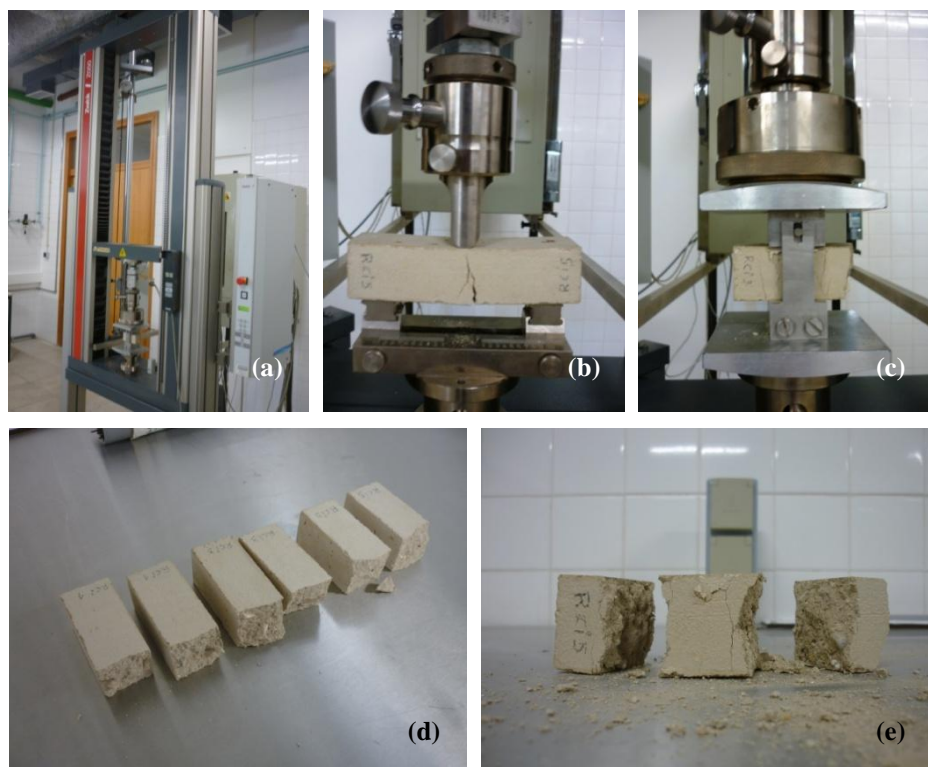
Procedimento experimental (determinação da resistência à compressão):

- colocação dos meios provetes resultantes do ensaio de flexão no suporte para ensaio de compressão (com uma área de contacto de 1600mm^2) e com as faces de moldagem em contacto com as superfícies de carregamento
- aplicação da carga com uma velocidade de 5,2mm/min ($100\pm10\text{N/s}$), até à rotura, registando-se o valor da carga última ao qual os provetes resistem – F_c

Nota: Durante o ensaio de resistência à tracção por flexão foram ensaiados 6 provetes de argamassa de cal aérea e agregado normalizado; no entanto o último provete de argamassa testado (NCa-6) foi ensaiado a uma menor velocidade de aplicação da carga, isto é, durante um maior período de tempo. Esta alteração teve por base o facto de argamassas de cal aérea apresentarem geralmente menores

resistências comparativamente a argamassas de cimento. Para tal, para além de ensaiadas a uma menor velocidade, deveria ter sido aplicado um menor carregamento.

Como era de esperar obteve-se um maior valor de resistência à flexão para a argamassa testada com menor velocidade de aplicação da carga do que as restantes; no entanto, para efeitos de comparação só foram consideradas as primeiras cinco argamassas testadas.



a – suporte para ensaio de flexão/compressão; b – ensaio de flexão; c – ensaio de compressão; d - extremidades dos provetes resultantes do ensaio de flexão; e – extremidades dos provetes resultantes do ensaio de compressão

Figura 4.21 – Ensaio da determinação da resistência mecânica

Os resultados são expressos em MPa e de acordo com a seguinte expressão (CEN, 1999; UNL/FCT, 1999):

- Resistência à flexão:

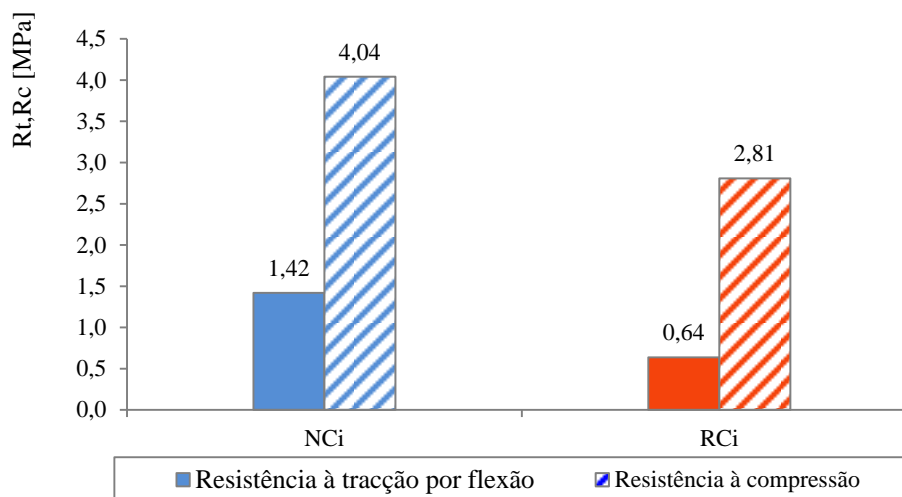
$$R_c = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (4.7)$$

- Resistência à compressão:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (4.8)$$

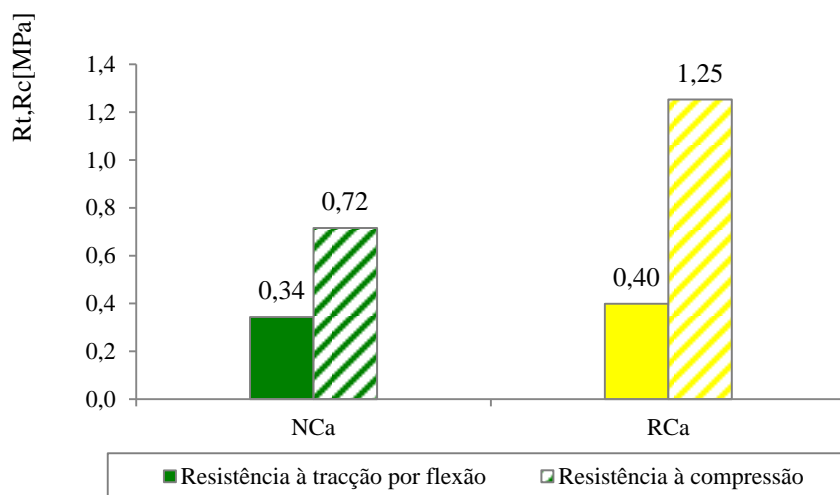
Em que b é o lado da secção quadrada do prisma (neste caso $b=40\text{mm}$); l a distância entre apoios (neste caso $l=100\text{mm}$); A a área de contacto (neste caso $A=40 \times 40=1600\text{mm}^2$) e F_f, F_c [N] forças de rotura para a flexão e compressão, respectivamente.

Nas figuras 4.22 e 4.23, apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de determinação da resistência à tracção por flexão e resistência à compressão dos provetes ensaiados aos 28 e aos 90 dias, respectivamente. Nas tabelas I.10 e I.11 do Anexo I, indicam-se as resistências à tracção por flexão e resistências à compressão obtidas para cada tipo de provete de argamassa ensaiado.



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado

Figura 4.22 – Resultados médios das resistências mecânicas (28 dias)



¹⁾NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

Figura 4.23 – Resultados médios das resistências mecânicas (90 dias)

Ao analisar as figuras 4.22 e 4.23, em relação às argamassas de cal aérea, observa-se que as argamassas com agregados finos reciclados (RCa) apresentaram resistências mecânicas superiores aos valores registados pelas argamassas com agregados finos normalizados (NCa). A preponderância de

agregados reciclados de maiores dimensões na argamassa ajuda a explicar esta diferença das resistências mecânicas.

No que diz respeito às argamassas de cimento, verifica-se que, contrariamente às argamassas de cal aérea, as argamassas contendo agregados normalizados (NCi) apresentaram resistências mecânicas superiores às contendo agregados finos reciclados (RCi). Neste caso o ligante confere maior resistência mecânica e atenua a variabilidade dos agregados reciclados.

4.7.4 – Aderência ao suporte

A aderência é uma característica de particular importância no caso de argamassas aplicadas a revestimentos, pois permite avaliar a ligação destas com o suporte. Um material muito rígido e com elevada aderência ao suporte (ex.: argamassa fortemente doseada em cimento) é muito susceptível aos movimentos do suporte, em resultado dos quais pode apresentar vários níveis de fendilhação.

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com as regras estipuladas pela norma EN 1015-12:1999 (CEN, 1999) e pela ficha de ensaio Fe 21 (UNL/FCT, 1996). De seguida indicam-se os equipamentos e respectivo procedimento de ensaio (CEN, 1999; UNL/FCT, 1996), figura 4.24.

Equipamentos:

- estufa ventilada
- tijolos (300cmx200cmx40cm)
- borrifador
- régua graduada
- moldura de madeira
- pastilhas quadradas (50mmx50mm)
- rebarbadora
- cola de alta resistência (resina epóxida)
- acessório de arrancamento (dinamómetro)

Procedimento experimental:

- secagem dos provetes em estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$ até obter massa constante
- colocação da moldura de madeira nas faces laterais menores do tijolo e borrifam-se o suporte ao longo da sua maior superfície
- em seguida, procede-se à colocação da argamassa em pasta em toda a extensão da superfície borrifada, até a superfície ficar totalmente lisa

- após a cura do provete, procede-se às marcações dos locais de entalhe. Os entalhes são realizados com o auxílio de uma rebarbadora, de modo a descer sobre o provete, até atingir a superfície do tijolo. Estes entalhes são quadrangulares e possuem 2cm de espessura
- colagem das pastilhas metálicas sobre as zonas delimitadas pelas incisões, deixando-se secar durante um período mínimo de 48h
- colocação do dinamómetro sobre cada uma das pastilhas em análise. Após verificação do valor zero no manómetro, roda-se o manípulo do dinamómetro impondo uma força constante até rotura entre o plano de contacto da argamassa e o suporte
- registo do valor da força máxima exercida e avaliação do tipo de rotura obtida, tendo em conta os cenários possíveis



a – marcação dos locais de entalhe; b – realização dos entalhes; c – provetes com marcação dos entalhes; d – acessório de arrancamento; e – aplicação da força; f – aspecto final dos provetes, após realização do ensaio

Figura 4.24 – Ensaio de aderência ao suporte

Os resultados deste ensaio vêm expressos em MPa, sendo que a tensão de aderência associada a cada pastilha (σ_a) é dada pela seguinte expressão (CEN, 1999; UNL/FCT, 1996):

$$\sigma_a = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (4.9)$$

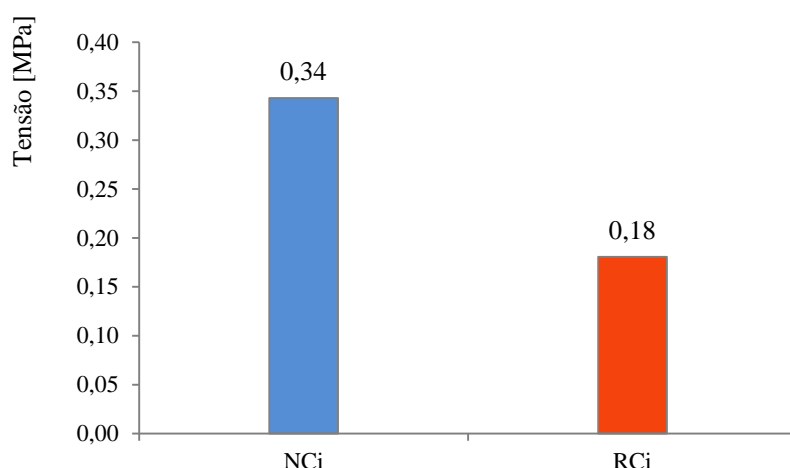
Sendo F a força de rotura expressa em N e S a área da pastilha em mm² (S=1963mm², no caso de uma pastilha circular).

Por motivos de exequibilidade de ensaio em substituição das pastilhas circulares foram utilizadas pastilhas quadradas. Neste sentido, como o dinamómetro está programado para a utilização de pastilhas circulares foi realizada uma conversão dos resultados obtidos através do seguinte factor de conversão:

$$\sigma'_a = \frac{F}{A_o} \times \frac{A_o}{A_{\square}} \text{ [MPa]} \quad (4.10)$$

Sendo F a força de rotura expressa em N; A_o a área da pastilha circular em mm^2 ($A=1963\text{mm}^2$); A_{\square} a área da partilha quadrada em mm^2 ($A=50 \times 50 = 2500\text{mm}^2$) e σ'_a o valor da tensão de aderência associada a cada pastilha quadrada em MPa.

Nas figuras 4.25 e 4.26 e tabelas 4.5 e 4.6 encontra-se os resultados médios obtidos das três determinações efectuadas em cada provete tipo, aos 28 e 90 dias, respectivamente. Nas tabelas I.12 e I.13 do Anexo I, indicam-se os valores obtidos no ensaio de aderência ao suporte, com indicação dos respectivos desvios padrão.



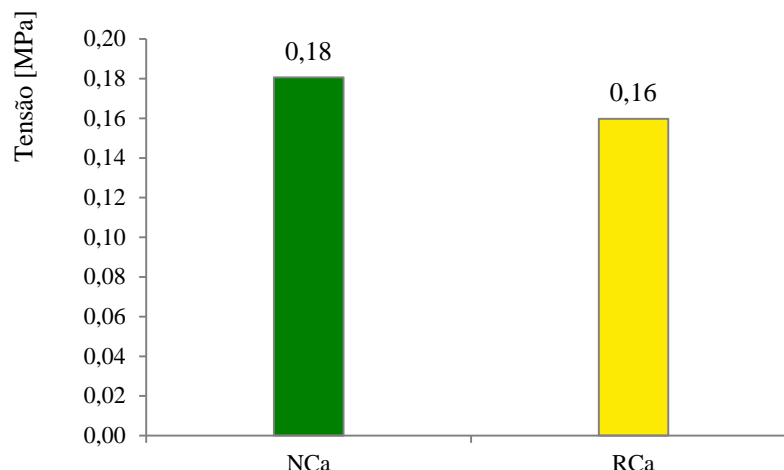
¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado

Figura 4.25 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte (28 dias)

Tabela 4.5 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte (28 dias)

Agregado Normalizado + cimento (NCi)				Agregado Reciclado + cimento (RCi)			
Pastilha	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura	Pastilha	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura
	σ_a	σ'_a			σ_a	σ'_a	
1	0,40	0,31	adesiva	1	0,23	0,18	adesiva
2	0,46	0,36	adesiva	2	0,23	0,18	adesiva
3	0,45	0,35	adesiva	-	-	-	-

Nota: no decorrer do ensaio, durante a marcação dos locais de entalhe, deu-se a rotura antecipada do local de entalhe n.º 3 do provete de argamassa de agregado reciclado com cimento (RCi), devendo este ponto ser desprezado.



¹⁾NCi: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCi: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

Figura 4.26 – Resultados médios do ensaio de aderência ao suporte (90 dias)

Tabela 4.6 – Resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte (90 dias)

Agregado Normalizado + cal aérea (NCa)				Agregado Reciclado + cal aérea (RCa)			
Pastilha	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura	Pastilha	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura
	σ'	σ			σ'	σ	
1	-	-	-	1	0,19	0,15	adesiva
2	0,23	0,18	adesiva	2	0,20	0,16	adesiva
3	0,23	0,18	mista	3	0,22	0,17	coesiva

Nota: durante o ensaio de aderência ao suporte aos 90 dias, ocorreu um defeito de colagem da pastilha n.º 1 do provete de argamassa de agregado normalizado com cal aérea (NCa), devendo este ponto ser desprezado.

Ao analisar as figuras 4.25 e 4.26, observa-se que, para ambas as “argamassas tipo”, os valores obtidos pelas argamassas com agregados reciclados apresentaram tensões de aderência inferiores às argamassas com agregados normalizados.

Em relação às argamassas de cimento, estes resultados confirmam a figura 4.22, isto é, as argamassas com agregados reciclados (RCi) apresentam resistências à tracção inferiores o que levou a um valor de tensão de aderência inferior.

Quanto às argamassas de cal aérea, a variação entre os valores da figura 4.23 e 4.25 deveria ser da mesma ordem de grandeza (a tensão de aderência e a resistência à tracção das argamassas com

agregados finos reciclados sempre inferiores). Porém, tendo em conta a existência de factores de variabilidade, tais como: (i) variabilidade entre provetes; (ii) heterogeneidade da composição de cada provete; (iii) reduzida dimensão dos provetes, esta conclusão não é imediata.

4.7.5 – Absorção de água por capilaridade

A capilaridade traduz a ascensão de água, através dos poros de um material. Para o mesmo grau de percentagem de poros (porosidade), quanto maior foi a dimensão dos poros de um material (porometria), menor será a sua absorção por capilaridade. A progressão da água será tanto mais rápida e significativa quanto mais finos forem os capilares do material (Faria, 2004).

A metodologia de ensaio realizou-se de acordo com as regras estipuladas pela ficha de ensaio Fe 06 (UNL/FCT, 1999). De seguida indicam-se os equipamentos e respectivo procedimento de ensaio (UNL/FCT, 1999), figura 4.27.

Equipamentos:

- estufa ventilada
- balança de precisão de 0,01g
- caixa de plástico com tampa
- tabuleiro de material rígido e não absorvente
- tijolo (300cmx200cmx40cm)
- papel absorvente
- esguicho com água destilada
- cronómetro

Procedimento experimental:

- após terem sido submetidos às condições de cura, os provetes prismáticos são postos a secar em estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$, até massa constante
- pesagem dos provetes secos, obtendo-se a massa M_0
- colocação do tabuleiro dentro de uma caixa de plástico com tampa, dentro da qual se verte água com altura suficiente para que se criem condições de saturação (aproximadamente 10cm de altura); o tabuleiro é posto sobre um tijolo, impedindo a entrada de água no seu interior e garantindo a sua horizontalidade
- coloca-se uma folha de papel absorvente no fundo do tabuleiro
- com o esguicho, cria-se uma lâmina de água no interior do tabuleiro com altura suficiente para que, depois da colocação dos provetes no seu interior, esta se mantenha a uma altura de 2mm;
- colocação dos provetes com a face plana menor (4x4) assente no tabuleiro

- fecha-se a caixa com a tampa, de modo a manter o nível da água dentro do recipiente até ao final do ensaio
- passados 5min, retiram-se os provetes, limpa-se a superfície imersa com papel absorvente, pesam-se e colocam-se novamente dentro da caixa de plástico, obtendo-se a massa M_i
- repetição do processo após 15, 30, 60, 180, 360min e a fim de cada 24h, até massa constante



a – provetes sujeitos às condições de saturação; b – vista do interior da caixa; c – pesagem dos provetes

Figura 4.27 – Ensaio de absorção de água por capilaridade

O valor da quantidade de água absorvida por cada determinação de massa, até ao instante t (M_t) é dado pela expressão seguinte (UNL/FCT, 1999):

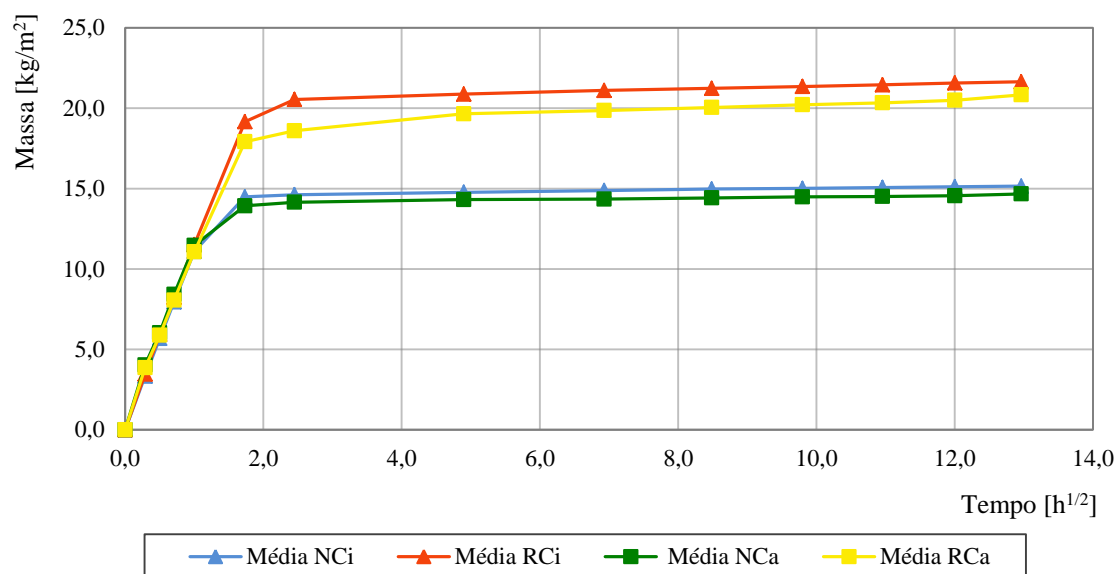
$$M_t = \frac{M_0 - M_i}{S} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4.11)$$

Sendo M_i a massa do provete no instante $t=i$ em g; M_0 a massa do provete seco em g e S a área da face em contacto com a água (neste caso, $S=0,04 \times 0,04=0,0016\text{m}^2$).

Com os valores obtidos (M_t), traça-se um gráfico que corresponde à absorção de água por capilaridade de cada provete ao longo do tempo, com abcissas em \sqrt{t} (t em horas) e ordenadas em kg/m^2 . O coeficiente angular do troço inicial do gráfico (segmento de recta) define o “coeficiente de absorção de água por capilaridade” de cada provete, expresso em $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$. É igualmente determinado o “valor assintótico” da curva de absorção de água, atingido quando a diferença entre dois valores sucessivos de massa determinados, m_i e m_{i-1} for inferior a 1%, expresso em kg/m^2 .

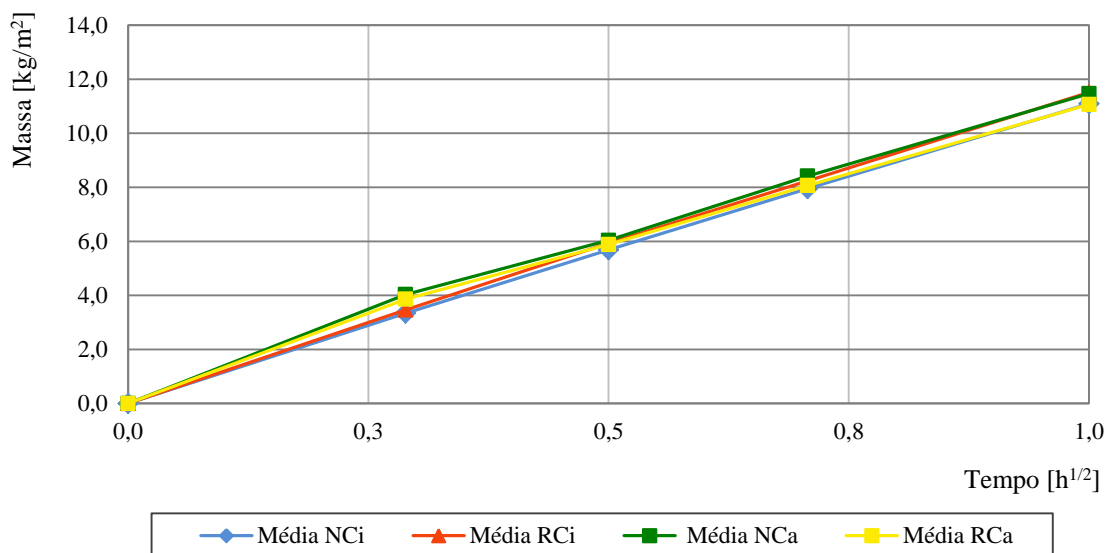
O coeficiente de absorção de água por capilaridade representa a velocidade inicial de absorção de água do provete e o valor assintótico representa a máxima absorção capilar a que o provete pode estar sujeito.

Na figura 4.28 encontram-se os valores médios de cada provete ao longo do tempo até massa constante e na figura 4.29 os valores médios de absorção de água por capilaridade correspondentes à primeira hora de ensaio. Nas tabelas I.14 a I.19 do Anexo I indicam-se os resultados individuais obtidos em cada provete de argamassa estudado.



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

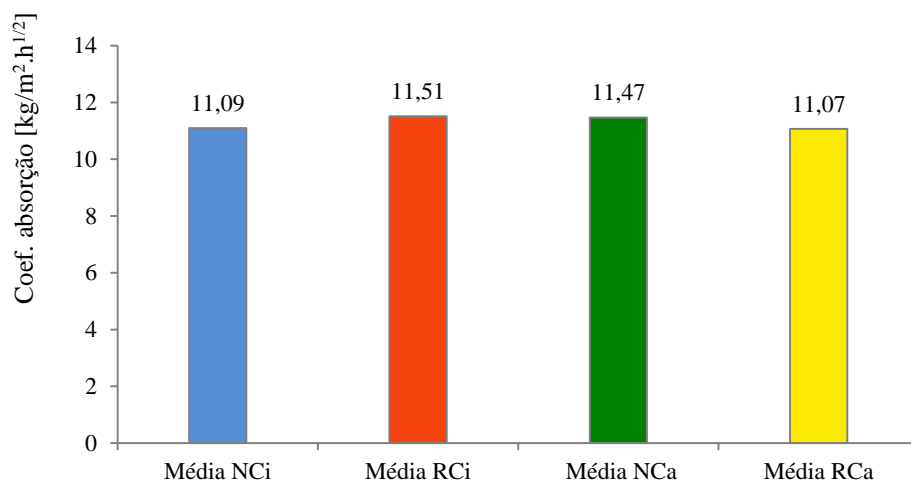
Figura 4.28 – Resultados médios da absorção de água por capilaridade



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

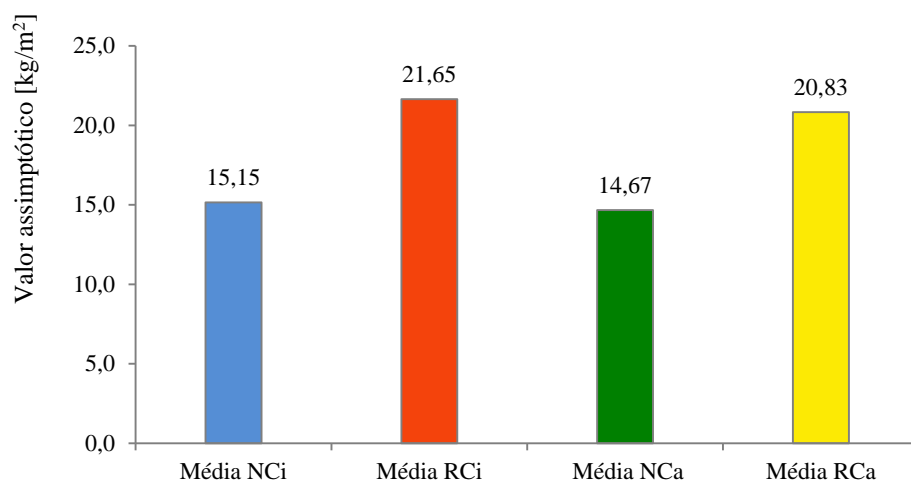
Figura 4.29 – Resultados médios da absorção de água por capilaridade na 1ª hora de ensaio

Nas figuras 4.30 e 4.31 apresentam-se os resultados médios obtidos do coeficiente de absorção de água e do valor assintótico para cada uma das argamassas estudadas.



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

Figura 4.30 – Resultados médios do coeficiente de absorção de água



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

Figura 4.31 – Resultados médios do valor assintótico

Ao analisar as figuras anteriores verifica-se que a argamassa de cimento e agregado reciclado (RCi) apresenta os piores resultados do ponto de vista da capilaridade, apresentando valores superiores de coeficiente de absorção capilar e de valor assintótico.

No caso da argamassa de cal aérea e agregado reciclado (RCa), enquanto que esta apresenta um valor assintótico superior ao da argamassa de cal aérea e agregado normalizado (NCa), no que diz respeito ao coeficiente de absorção de água por capilaridade esta apresenta-se como a melhor solução.

De notar que esta propriedade obtida (valor assintótico), por terem sido utilizados meios provetes, não pode ser comparada com argamassas homólogas, uma vez que nestas condições o volume total dos provetes a ser preenchido por água não é constante.

4.7.6 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente, porosidade aberta

A massa volúmica e a porosidade aberta são características físicas das argamassas que influenciam o seu comportamento mecânico, nomeadamente ao nível das resistências mecânicas e módulo de elasticidade (Barreto, 2010). O aumento da massa volúmica implica um aumento do módulo de elasticidade, das resistências mecânicas e da compactidade e, por sua vez, menor porosidade.

A massa volúmica e a porosidade aberta das argamassas foram determinadas de acordo com as regras estipuladas pela ficha de ensaio Fe 01 e Fe 02 (UNL/FCT, 1996), respectivamente. Os equipamentos e procedimentos de ensaio, a seguir indicados, foram comuns em ambos os ensaios, tendo apenas variado as expressões segundo as quais se calcularam os resultados. Para este ensaio foram utilizadas as extremidades resultantes dos meios provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão.

Equipamentos

- estufa ventilada
- balança com precisão 0,001g
- exsiccador
- bomba de vácuo ligada ao exsiccador
- funil de vidro
- mangueiras de plástico

Procedimento experimental

- após terem sido submetidos às condições de cura, os provetes são postos a secar em estufa ventilada a $T=60\pm5^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante
- pesagem dos provetes secos, obtendo-se a massa M_0
- colocação dos provetes no interior do exsiccador fechado, fazendo diminuir gradualmente a pressão no seu interior até aos 2667Pa (20mm de mercúrio) através de uma bomba de vácuo; os provetes são mantidos a esta pressão durante 24h
- ao fim de 24h, coloca-se a água no funil e faz-se penetrar a água dentro do exsiccador, lentamente e a uma temperatura de 15 a 20°C , até imersão total dos provetes, durante cerca de 15min; os provetes são mantidos em imersão total e sujeitos às condições de pressão anteriormente definidas (2667Pa) durante 24h

- após 24h, desliga-se a bomba de vácuo deixando os provetes sujeitos à pressão atmosférica normal e em imersão durante mais 24h
- pesagem dos provetes em imersão (pesagem hidrostática), obtendo-se a massa M_1
- retiram-se os provetes da água, absorve-se a água em excesso com um pano húmido e determina-se a massa dos provetes saturados, M_2



a – equipamentos utilizados; b – bomba de vácuo; c - provetes em imersão total;
d – pesagem hidrostática; e – pesagem dos provetes saturados

Figura 4.32 – Ensaio de determinação da massa volúmica

Os resultados são obtidos de acordo com as seguintes expressões (UNL/FCT, 1996):

- Massa volúmica real (MVR):

$$\frac{M_0}{M_0 - M_1} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.12)$$

- Massa volúmica aparente (MVA):

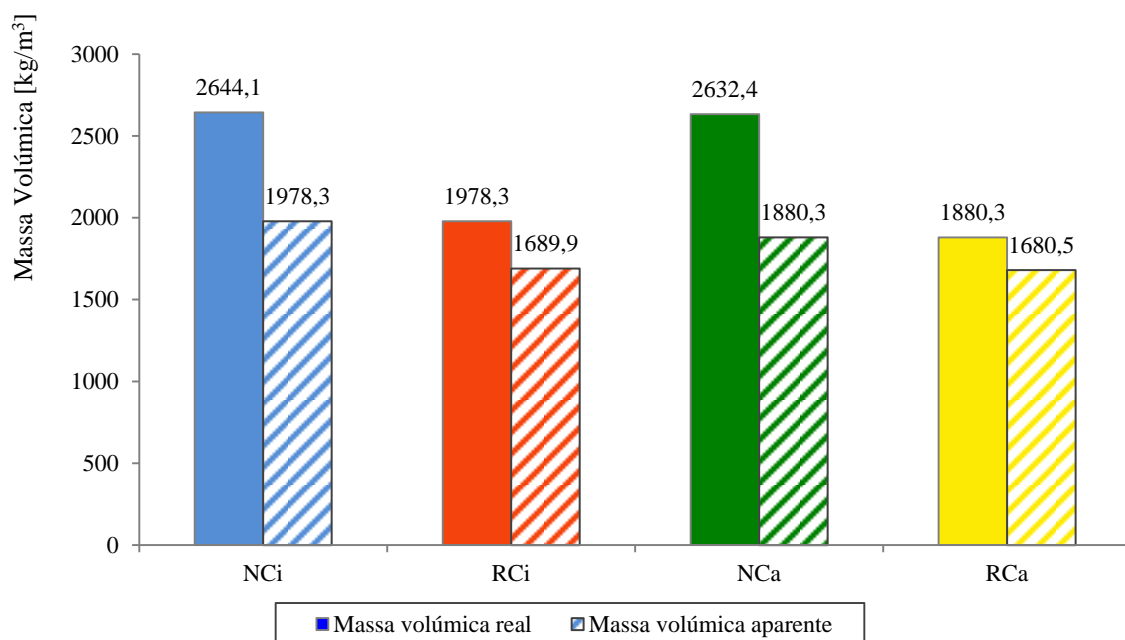
$$\frac{M_0}{M_2 - M_1} \times 10^3 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (4.13)$$

- Porosidade aberta (PA):

$$\frac{M_2 - M_0}{M_2 - M_1} \times 100 \text{ [%]} \quad (4.14)$$

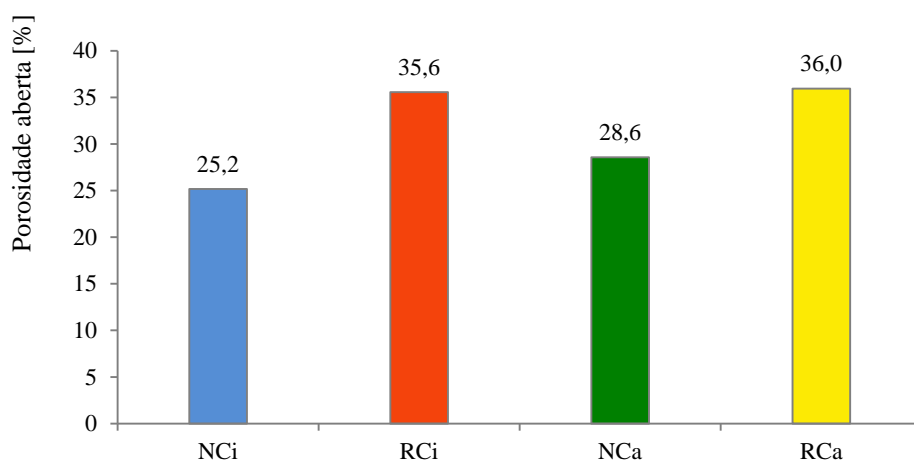
Sendo M_0 a massa dos provetes secos em g, M_1 a massa dos provetes correspondente à pesagem hidrostática em g e M_2 a massa dos provetes saturados em g.

Nas figuras seguintes, figura 4.33 e 4.34, apresentam-se os valores médios obtidos das massas volúmicas real e aparente e porosidade aberta para cada tipo de argamassa estudada. Nas tabelas I.20, I.21 e I.22 do Anexo I apresentam-se os resultados individuais de cada provete de argamassa.



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

Figura 4.33 – Valores médios das massas volúmicas real e aparente



¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado

Figura 4.34 – Valores médios de porosidade aberta

Tendo em conta os resultados obtidos verifica-se que as argamassas com agregados finos normalizados (NCi e NCa) apresentam massas volúmicas superiores às argamassas com agregados finos reciclados (RCi e RCa). Estes resultados confirmam a figura 4.34, isto é, como as argamassas com agregados finos reciclados são mais porosas apresentam massas volúmicas menores.

Por outro lado, e tendo em conta os valores obtidos na determinação do valor assintótico (fig. 4.31), verifica-se que as argamassas com agregados finos reciclados (RCi e RCa) absorveram mais água, o que implica uma porosidade aberta maior (fig. 4.34).

Em relação às argamassas de cal aérea e agregados reciclados (RCa), sendo mais porosas do que as argamassas de cal aérea e agregados finos normalizados (NCa), deveriam ser menos resistentes. No entanto, como foi referido, a preponderância de agregados reciclados de maiores dimensões nas argamassas de cal aérea pode justificar o aumento das resistências mecânicas.

As argamassas de cimento e agregados finos normalizados (NCi) são menos porosas (maior compactidade), logo têm massas volúmicas maiores, maior resistência mecânica e maior módulo de elasticidade dinâmico.

Capítulo V

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 – Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma análise dos resultados obtidos na presente dissertação, comparando-os com os de outros autores (referidos no Capítulo III), no que diz respeito à caracterização física e mecânica das argamassas estudadas, tendo presente no entanto a existência de algumas diferenças, tais como:

(i) diferentes autores terem utilizado agregados reciclados com composição e percentagens de substituição diferentes, diferentes equipamentos e terem efectuado os ensaios de acordo com metodologias de ensaio diferentes; (ii) o traço utilizado ter sido, por vezes, diferente; (iii) alguns ensaios de determinação de características homólogas terem sido efectuados em idades diferentes.

5.2 – Análise e discussão de resultados

A comparação dos resultados obtidos é feita começando pela caracterização dos agregados, passando pela argamassa em pasta e, por fim, pela argamassa endurecida.

Em relação às argamassas de cal aérea, tendo em conta que, à parte de outros factores de variabilidade referidos, a proporção utilizada é diferente – o traço utilizado na presente dissertação foi de 1:4 e nos outros autores considerados foi de 1:3 – optou-se por não comparar os valores obtidos. Contudo, apresentam-se os resultados para enquadrar os valores obtidos na presente dissertação.


Quanto às argamassas de cimento, apesar de, do ponto de vista dos constituintes, os materiais (em particular os agregados reciclados) serem relativamente diferentes, regista-se a ordem de grandeza dos valores e faz-se uma comparação, uma vez que o traço é o mesmo.

Na tabela 5.1 resumem-se os valores dos provetes de argamassa estudados na presente dissertação, obtidos para as diferentes características estudadas.

Tabela 5.1 – Comparação das características físicas e mecânicas dos provetes de argamassa da presente dissertação

Autor	Material	Idade [dias]	Características físicas										Características mecânicas			
			Ba [kg/m ³]	D [mm]	d [mm]	MF	Esp [%]	Cac [kg/m ² .h ^{1/2}]	VA [kg/m ²]	MVR [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	PA [%]	Edin [MPa]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ader. [MPa]
A. Barra (RCi)	AFR		1322,9	12,7	0,075	3,2										
	Cimento		951,8	x	x	x										
	Arg. em pasta						72,0									
	Arg. endur.	28						11,51	21,65	1978,3	1689,9	35,6	3351	0,64	2,81	0,18
A. Barra (NCi)	AFN		1556,8	1,19	0,149	2,2										
	Arg. em pasta						68,8									
	Arg. endur.	28						11,09	15,15	2644,1	1978,3	25,2	9485	1,42	4,04	0,34
A. Barra (RCa)	Cal aérea		326,6	x	x	x										
	Arg. em pasta						78,5									
	Arg. endur.	90						11,07	20,83	1880,3	1680,5	36,0	2575	0,4	1,25	0,16
A. Barra (NCa)	Arg. em pasta						77,3									
	Arg. endur.	90						11,47	14,67	2632,4	1880,3	28,6	5126	0,34	0,72	0,18

¹⁾ x - Ensaio não realizado;

 Ensaio não aplicável.

5.2.1 – Caracterização física dos agregados

Em relação à caracterização física dos constituintes das argamassas estudadas, comparam-se os valores obtidos no ensaio de determinação da baridade dos agregados finos reciclados, figura 5.1

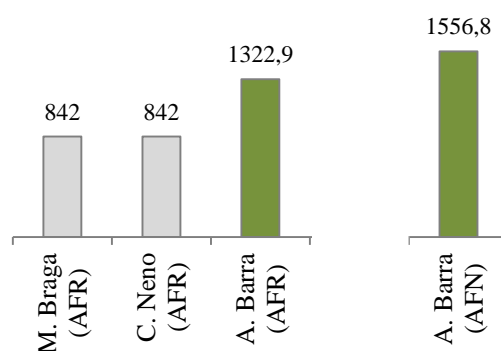


Figura 5.1 – Resultados do ensaio de baridade [kg/m³]

A baridade dos agregados reciclados apresenta geralmente valores menores do que os agregados naturais (Gonçalves, 2001). Tendo em conta os resultados obtidos no ensaio de determinação da baridade (fig. 5.1) da presente dissertação para o agregado fino normalizado e para o agregado fino reciclado, verifica-se que tal acontece.

5.2.2 – Caracterização da argamassa em pasta

Em relação à argamassa em pasta fez-se o ensaio de espalhamento. Na figura 5.2 apresentam-se os valores obtidos na presente dissertação e por outros.

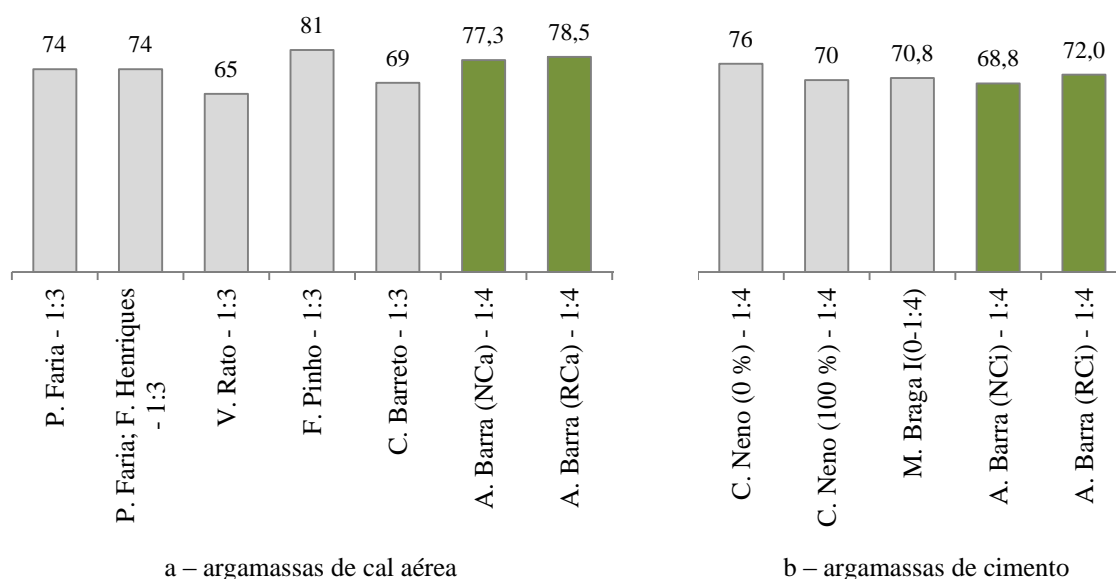


Figura 5.2 – Resultados do ensaio de espalhamento [%]

Tendo em conta a existência de factores que implicam variabilidade, tais como: (i) a razão a/l ; (ii) a granulometria do ligante e do agregado; (iii) o tipo de ligante; (iv) o traço utilizado, não é possível comparar os valores obtidos para esta característica. Porém, como foi referido, registam-se os resultados. Comparando os valores obtidos relativamente a esta característica (espalhamento) observa-se que, quando comparadas às argamassas de referência da presente dissertação, as argamassas contendo agregados finos reciclados apresentam, para ambos os ligantes, uma maior necessidade de água a adicionar à mistura. De acordo com diversos autores (Gonçalves, 2007; Neno, 2010), o betão é um dos principais constituintes dos RCD. Os resíduos de betão que possivelmente fazem parte da constituição dos agregados finos reciclados utilizados na preparação das argamassas são mais porosos e, como tal, possuem uma maior capacidade de absorção de água do que a areia natural.

5.2.3 – Caracterização da argamassa endurecida

Sobre as argamassas endurecidas realizaram-se ensaios de caracterização física e mecânica, nomeadamente a determinação da massa volúmica, porosidade aberta, absorção de água por capilaridade, resistências mecânicas, módulo de elasticidade e aderência ao suporte.

Massa volúmica real e massa volúmica aparente

A massa volúmica aparente das argamassas depende, no limite, da quantidade de água utilizada. Quanto maior é a quantidade de água utilizada (maior a/l), maior é a quantidade de água que evapora, durante o endurecimento, e menor será a massa volúmica aparente. Porém, tal como foi referido, tendo em conta que estas características dependem de factores de variabilidade que interferem na sua comparação, apresenta-se os resultados finais na figura 5.3, apenas para se ter uma ordem de grandeza dos obtidos no presente trabalho.

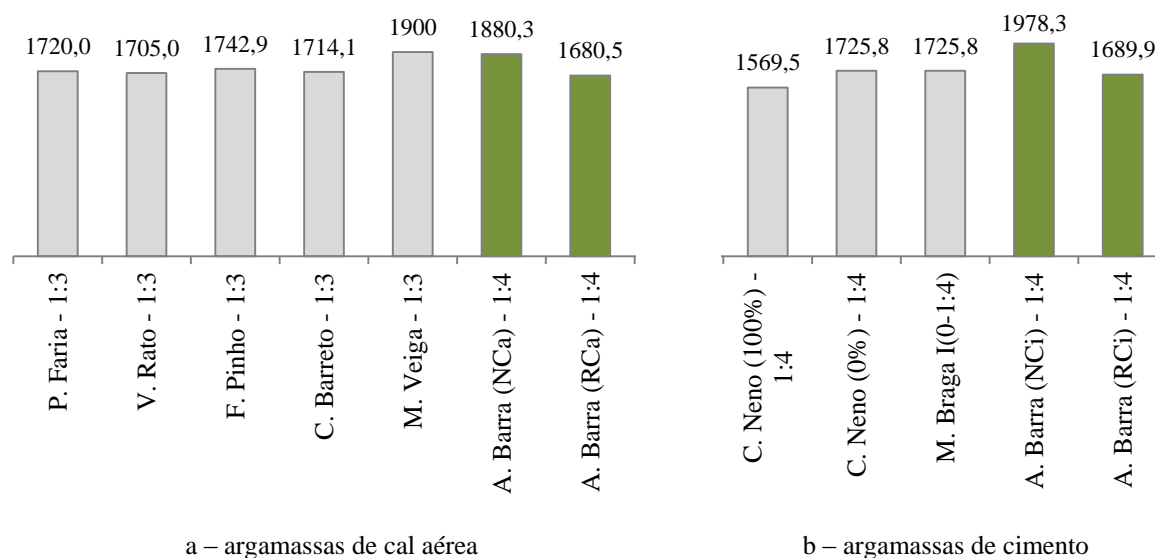


Figura 5.3 – Resultados do ensaio de massa volúmica aparente [kg/m³]

Porosidade aberta

A porosidade aberta é uma característica que influencia o comportamento das argamassas, nomeadamente as suas resistências mecânicas e o módulo de elasticidade dinâmico. Para o mesmo tipo de ligante, quanto maior é a porosidade aberta (P), menor é a compacidade (C), ($P+C=100\%$), menor é o módulo de elasticidade e menor é a resistência mecânica. Na figura 5.4 apresentam-se valores obtidos na presente dissertação e por os outros autores.

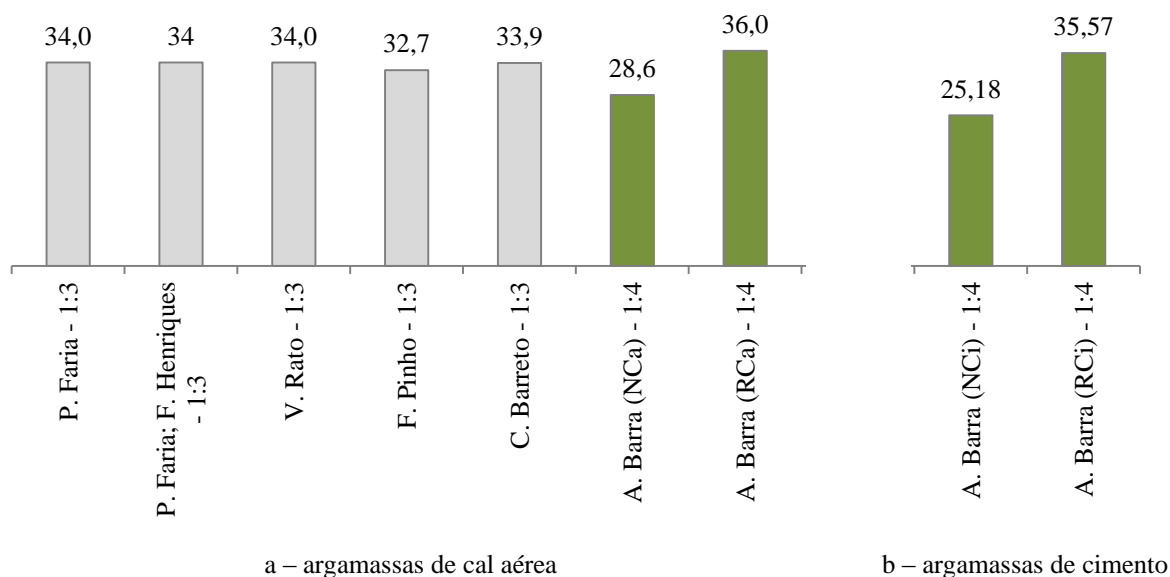


Figura 5.4 – Resultados do ensaio de porosidade aberta [%]

No caso das argamassas de cimento, comparando os valores obtidos na presente dissertação para esta característica observa-se que as argamassas com agregados finos reciclados são mais porosas do que as argamassas com agregados finos normalizados. Tendo em conta os valores obtidos no ensaio do módulo de elasticidade, figura 5.6, verifica-se que a um maior valor de porosidade aberta obtido pelas argamassas com agregados finos reciclados (RCi) correspondeu um menor módulo de elasticidade.

Absorção de água por capilaridade

A quantidade total de água absorvida (valor assintótico) depende essencialmente da porosidade aberta total, sendo maior quanto maior nas argamassas mais porosas (Rato, 2006). No entanto, os valores obtidos de valor assintótico não serão discutidos e comparados com os resultados dos autores pesquisados, pois, no presente estudo, o ensaio foi realizado com meios provetes.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (velocidade inicial de absorção de água) depende de factores tais como a dimensão dos poros e a conectividade da rede porosa (Rato, 2006). Quanto menor for a porometria (dimensão do poro capilar), maior será a quantidade de água absorvida por capilaridade. Tendo em conta que, na presente dissertação, não foi realizado o ensaio de porometria das argamassas, não é possível estabelecer uma comparação entre os valores. No entanto, na figura 5.5 regista-se a ordem de grandeza dos valores obtidos na presente dissertação e por outros autores.

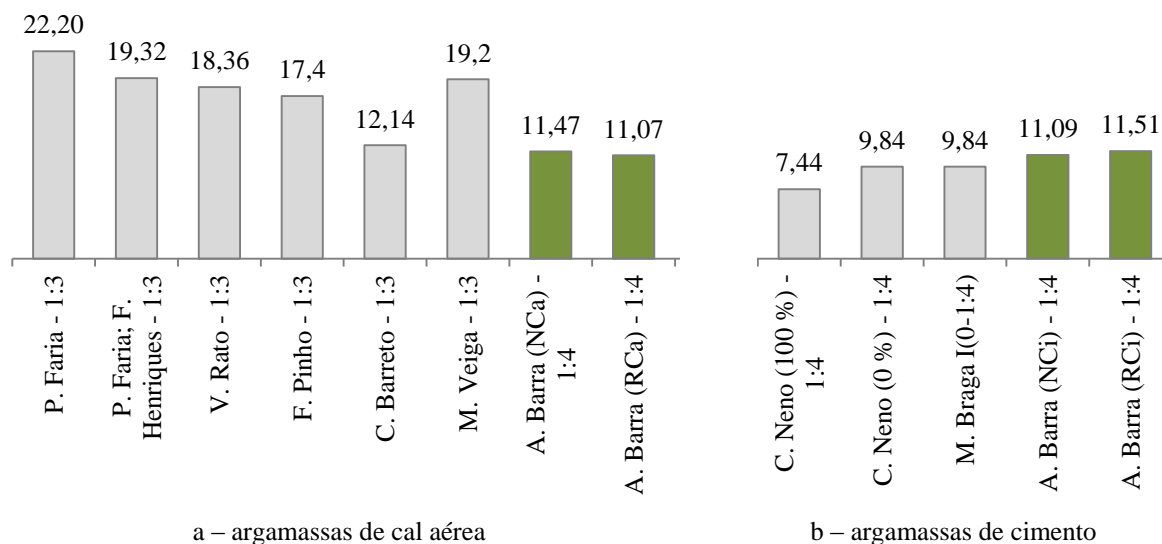


Figura 5.5 – Resultados obtidos no coeficiente de absorção de água por capilaridade [kg/m².h^{1/2}]

Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é uma característica mecânica que está relacionada com a massa volúmica aparente. Quanto maior for a massa volúmica aparente maior é o módulo de elasticidade dinâmico. Na figura 5.6 apresentam-se os valores obtidos na presente dissertação e por outros autores.

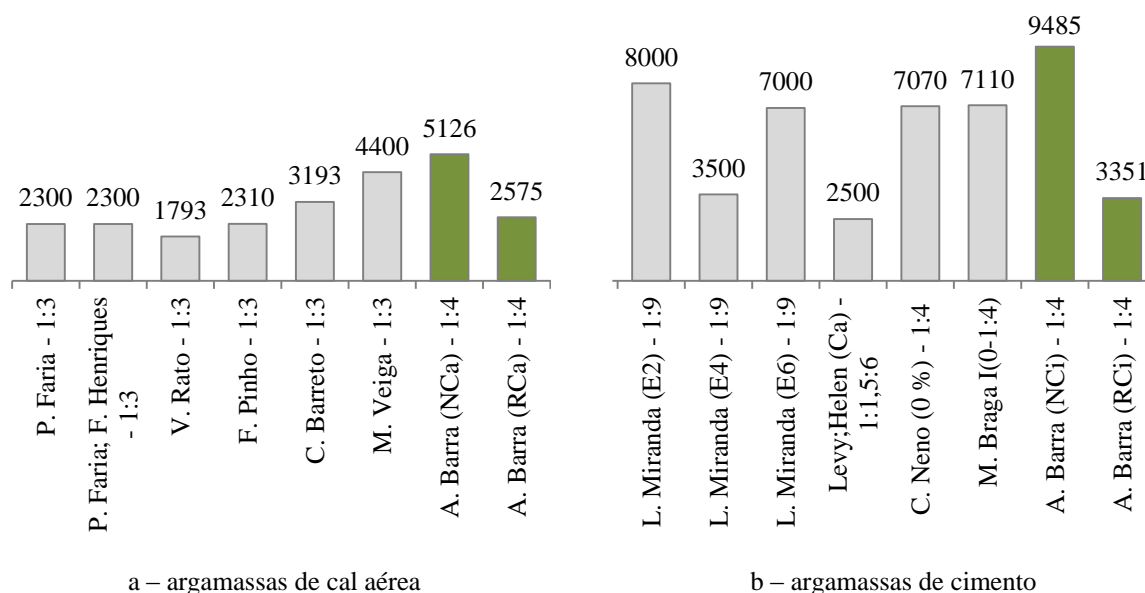


Figura 5.6 – Resultados do ensaio do módulo de elasticidade dinâmico [MPa]

No caso da argamassa de cimento, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente na presente dissertação (RCi) com C. Neno (Neno, 2010) e M. Braga (Braga, 2010) observa-se que o valor obtido na presente dissertação é inferior. Tendo em conta os valores obtidos no ensaio de

determinação do módulo de elasticidade dinâmico, figura 5.6, verifica-se que menores valores de massa volúmica aparente obtidos na presente dissertação conduziram a módulos de elasticidade menores.

Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão

As resistências mecânicas são influenciadas pela massa volúmica e pela porosidade aberta. Quanto maior for a massa volúmica, maior a resistência mecânica e menor a porosidade aberta, para a mesma composição. Na figura 5.7 apresenta-se os valores obtidos na presente dissertação e por outros autores.

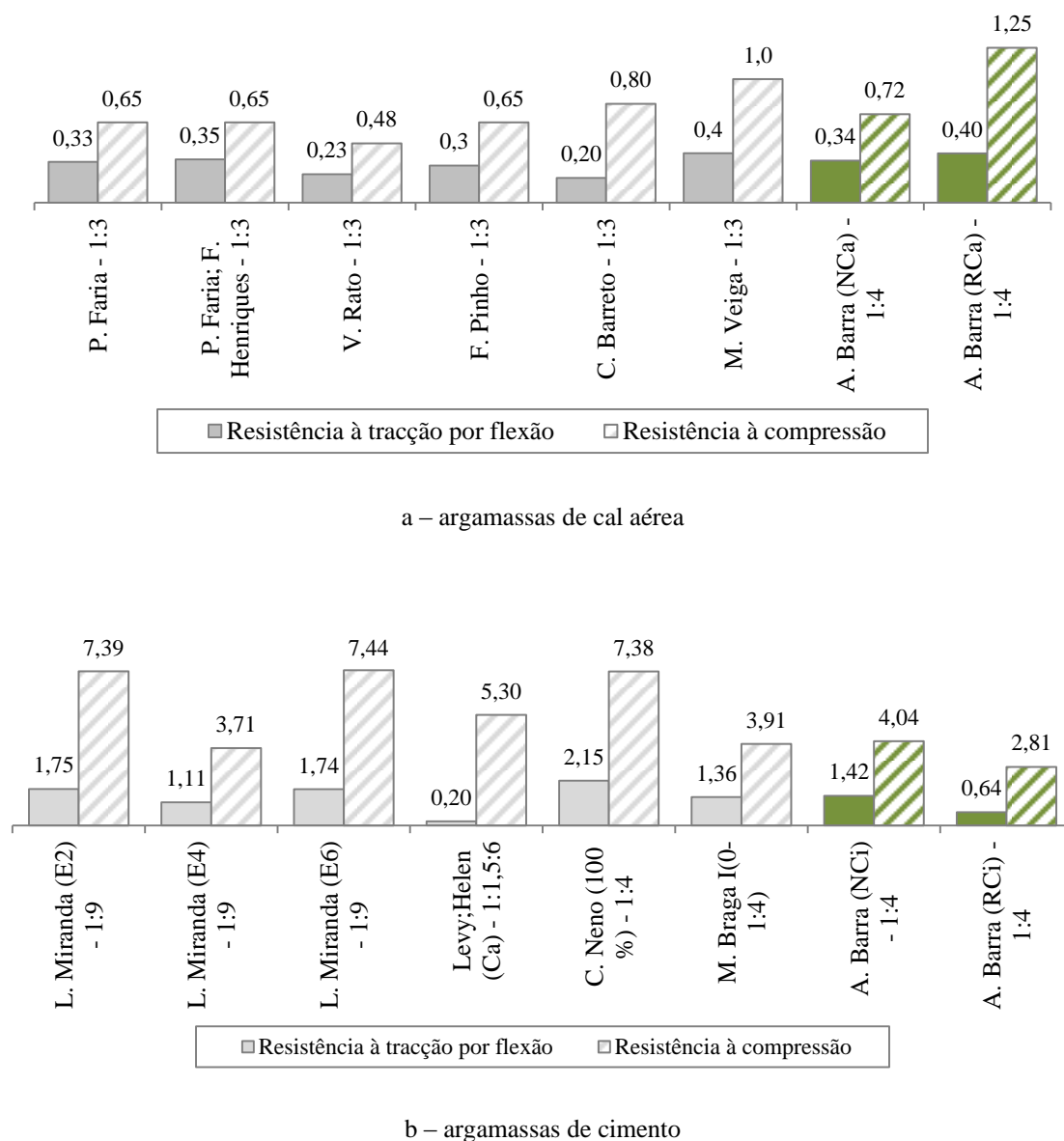


Figura 5.7 – Resultados do ensaio de determinação das resistências mecânicas à tracção por flexão [MPa] e à compressão [MPa]

No caso da argamassa de cimento, comparando o valor obtido no ensaio de massa volúmica aparente na presente dissertação (RCi) com o valor obtido M Braga (Braga, 2010) observa-se que o valor obtido na presente dissertação (RCi) é superior, pelo que implicaria um maior valor de resistência mecânica. Os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência mecânica, figura 5.8, confirmam que, a valores superiores de massa volúmica aparente correspondem maiores resistências mecânicas.

Aderência ao suporte

A aderência ao suporte e a resistência à tracção por flexão são duas características mecânicas que se relacionam, variando estas duas de forma directamente proporcional. Na figura 5.9 Na figura 5.9 apresenta-se os valores obtidos na presente dissertação e por outros autores.

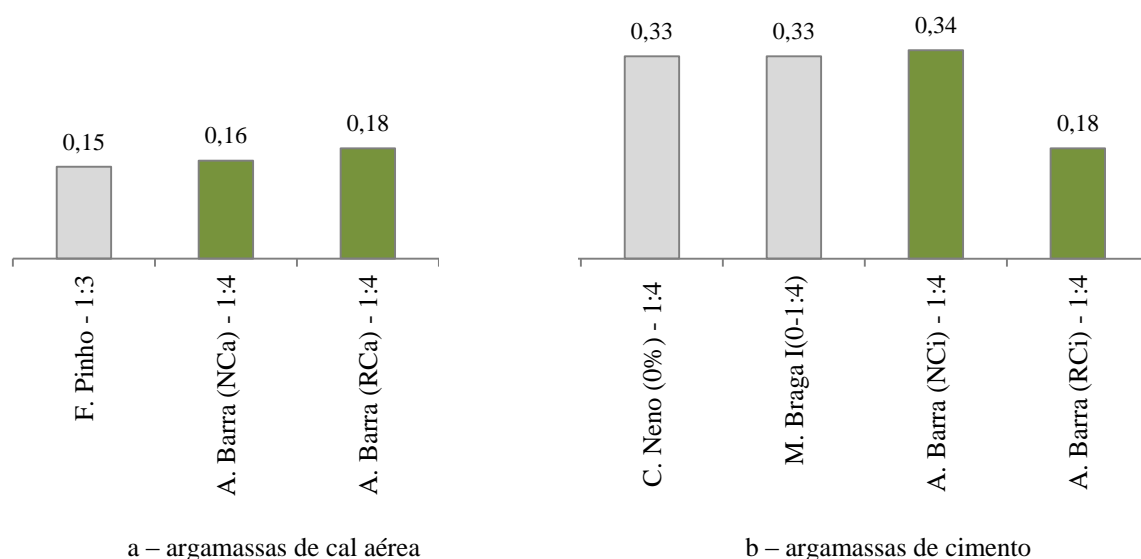


Figura 5.9 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte [MPa]

No caso da argamassa de cimento, comparando o valor obtido no ensaio de resistência à tracção por flexão, figura 5.7, pelos provetes de argamassa da presente dissertação (RCi), com C. Neno (Neno, 2010) e M. Braga (Braga, 2010) observa-se que o valor de C. Neno (Neno, 2010) e M. Braga (Braga, 2010) é superior, o que levou a um valor de aderência ao suporte superior ao valor obtido na presente dissertação (RCi).

Capítulo VI

CONCLUSÕES

6.1 – Considerações Iniciais

Esta dissertação teve com objectivo avaliar, do ponto de vista experimental, o comportamento físico e mecânico de argamassas não estruturais com agregados finos reciclados provenientes de RCD.

Com este fim, foram moldados e ensaiados vários provetes de argamassa de cal aérea e agregado fino reciclado (RCa) e argamassa de cimento e agregado fino reciclado (RCi), ao traço volumétrico 1:4 (ligante:agregado). As propriedades obtidas foram apresentadas, analisadas e comparadas com outras de argamassas homólogas, mas com agregados finos normalizados (NCa e NCi).

Neste capítulo fazem-se comentários finais ao trabalho desenvolvido, sintetizam-se as conclusões obtidas, confrontam-se os objectivos propostos e os alcançados e referem-se possíveis desenvolvimentos futuros.

6.2 – Conclusões e comentários finais

A construção civil é uma actividade muito antiga. No entanto só nas últimas décadas começam a surgir preocupações com o destino a dar aos resíduos provenientes desta acção, que na sua maioria têm como destino final aterros sem qualquer tratamento que providencie a sua valorização.

Sendo esta uma actividade em constante mudança é importante criar medidas que apontem para a qualidade ambiental e sustentabilidade económica do futuro, nomeadamente a reutilização dos RCD na actividade construtiva.

O conhecimento das propriedades dos agregados finos reciclados, desde as suas características individuais ao seu comportamento em argamassas, é importante para analisar a viabilidade de utilização dos RCD na composição de argamassas, sem fins estruturais. Deste modo, foi estabelecida uma relação entre as propriedades obtidas e outras de argamassas homólogas, tendo presente no entanto a existência de factores de variabilidade que afectam essa comparação, em particular e do ponto de vista dos constituintes, a heterogeneidade dos agregados reciclados. Com os resultados obtidos foram estabelecidas conclusões aqui representadas, que permitiram analisar e relacionar as argamassas estudadas.

Relativamente ao comportamento mecânico das argamassas, nomeadamente ao nível das resistências mecânicas, observou-se um aumento das resistências mecânicas nos provetes de argamassa de cal aérea e agregados finos reciclados (RCa), à tracção por flexão e à compressão (2,5% e 42,4%, respectivamente). Este aumento pode estar relacionado com a variabilidade dos agregados reciclados de maiores dimensões, que por sua vez, condicionam a resistência mecânica da argamassa; quanto às argamassas de cimento e agregado reciclado (RCi) observou-se que, quando comparadas às argamassas de referência (NCi), apresentam resistências mecânicas inferiores, facto que pode ser justificado pela maior resistência do ligante que pode atenuar a variabilidade dos agregados reciclados.

Os resultados obtidos no ensaio de aderência ao suporte, mais concretamente em relação às argamassas de cal aérea e agregados reciclados (RCa), não estão de acordo com o esperado; nomeadamente quando comparados com os valores obtidos nas resistências à tracção por flexão. É de referir que, a existência de factores de variabilidade, tais como, a heterogeneidade da composição entre os provetes, pode ter condicionado os resultados obtidos.

Quanto à análise da absorção de água por capilaridade, no que diz respeito à velocidade inicial de absorção de água por capilaridade, não foi possível estabelecer uma relação entre os resultados, dada a proximidade entre valores. Porém, no que diz respeito à quantidade máxima absorvida (valor assintótico), verifica-se que as argamassas com agregados reciclados (RCi e RCa) absorvem mais água por capilaridade. O facto de serem mais porosas e de terem uma menor massa volúmica justifica os resultados obtidos.

Assim e de uma forma geral, pode dizer-se que os resultados obtidos permitiram obter alguma compatibilidade entre as características das argamassas estudadas, o que justifica a continuação deste estudo que permitirá compreender melhor o comportamento de argamassas com agregados reciclados, contribuindo, de certa forma, para que a possibilidade de reutilização dos RCD se torne numa realidade.

6.3 – Objectivos propostos e alcançados

O principal objectivo da presente dissertação consistiu no estudo do comportamento físico e mecânico de argamassas de cal aérea e argamassas de cimento contendo agregados finos reciclados, recorrendo para o efeito a uma análise comparativa das propriedades obtidas com outras de argamassas homólogas (ao mesmo traço), mas com agregados finos normalizados.

Desta forma, pode dizer-se que o objectivo foi alcançado.

6.4 – Desenvolvimentos futuros

Como continuação do presente trabalho propõe-se as seguintes abordagens:

- caracterizar novos provetes de argamassa com substituição parcial de areia por agregados finos reciclados, isto é, utilizar diferentes percentagens de substituição
- proceder à caracterização química dos agregados finos reciclados, para uma melhor compreensão da influência da composição química do agregado no comportamento das argamassas
- realização de estudos sobre a viabilidade económica adjacente à realização de argamassas com agregados finos reciclados
- repetição dos procedimentos anteriores mas com diferentes amostras recolhidas ao longo do tempo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A CONSTRUÇÃO – Revista da Associação Regional dos Industriais de Construção e Obras Públicas de Leiria (pág. 33), n.º 73, Novembro de 2011.
- [2] ABDOL, R. Chini; FRANK Schultmann (2003) – “Deconstruction and Materials Reuse”, CIB Publication 287, Gainesville.
- [3] AFFONSO, Fernando José de Andrade (2005) – *Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos*. Tese de Mestrado em Ciências em Engenharia Civil, Universidade Federal, Rio de Janeiro.
- [4] ALGARVIO, Dora Alexandra Neto (2005) – *Reciclagem de resíduos de construção e demolição: Contribuição para controlo do processo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [5] BARRETO, Carolina (2010) – *Durabilidade de argamassas de cal aérea e bastardas face à acção de sais solúveis*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [6] BAVARESCO, Carlos Roberto (2001) – *Utilização de entulho reciclado para produção de argamassas*. Dissertação de Mestrado em Engenharias Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [7] BÖKE, H. *et al* (2006) – *Characteristics of brick used as aggregate in historic brick lime mortars and plasters*. Cement and Concrete Research 36 (pág. 1115-1122).
- [8] BRAGA, Mariana (2010) – *Desempenho de argamassas com agregados finos provenientes da trituração do betão – efeito de fíler e pozolânico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

-
- [9] BRITO, Jorge de (2005) – *Agregados reciclados e a sua influência nas propriedades dos betões*. Lição de síntese, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [10] COELHO, Ana Zulmira; TOGAL F. Pacheco; JALALI, Said (2009) – *A cal na construção*. Edições TecMinho.
- [11] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – *Methods of test for mortar for masonry. Part 12: Determination of adhesive strength of hardened rendering and plastering mortars on substrates*. EN 1015 – 12:1999. CEN, 1999.
- [12] CEN – *Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. EN 1015-3:1999. CEN, February, 1999.
- [13] CEN – *Methods of test for mortar for masonry. Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. EN 1015-11:1999. CEN, August, 1999.
- [14] CEN – *Aggregates for unbound and hydraulically bound materials for use in civil engineering work and road construction*. EN 13242:2002 + A1:2007.
- [15] COSTA, C. N. (2008) – *Sustentabilidade e impactes ambientais em engenharia civil. Parte I – A insustentabilidade*. Apontamentos da disciplina de Sustentabilidade. Licenciatura em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [16] COUTINHO, António Sousa (1997) – *Fabrico e propriedades do betão*. Volume I. 3ª edição, LNEC, Lisboa.
- [17] EVANGELISTA, Luís (2007) – *Betões executados com agregados finos reciclados de betão*. Dissertação de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [18] FARIA, Maria Paulina (2004) – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas: Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [19] FARIA P.; HENRIQUES, M. A. (2004) – *Current mortar in conservation: an overview*. International Journal for Restoration, vol. 10, n.º6 (pág. 609-622). Universidade Nova de Lisboa.

- [20] FERREIRA, José Fernando Bolarinho (2009) – *Aplicação de resíduos de construção e demolição (RCD) em camadas de sub-base não ligadas de estradas de baixo tráfego*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [21] GONÇALVES, A. P. (2001) – *Análise do desempenho de betões obtidos a partir de inertes reciclados provenientes de resíduos da construção*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [22] GONÇALVES, Paulo César Magalhães (2007) – *Betão com agregados reciclados: Análise comentada da legislação existente*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [23] INSTITUTO PORTUGUES DA QUALIDADE (IPQ) – *Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade*. NP EN 459 – 1:2011.
- [24] IPQ – *Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. NP EN 197 – 1:2001.
- [25] IPQ – *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica – Método de peneiração*. NP EN 933 - 1:2000.
- [26] IPQ – *Ensaio para a determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 3: Método para a determinação da baridade e dos vazios*. NP EN 1097 – 3:2002.
- [27] LEITE, Mônica Baptista (2001) – *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- [28] LEVY, Salomon Mony; HELENE, Paulo (1997) – *Vantagens e desvantagens de argamassas produzidas com entulho de obra, finamente moído*. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil.
- [29] LIMA, José António (1999) – *Proposição de directrizes para a produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos.

-
- [30] LOURENÇO, Cristina Isabel de Campos (2007) – *Optimização de sistemas de demolição: demolição selectiva*. Dissertação de Licenciatura em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [31] MIRANDA, Leonardo (2000) – *Estudo de factores que influem na fissuração de revestimentos de argamassas com entulho reciclado*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [32] MIRANDA, Leonardo F. R.; SELMO, Sílvia M. S. (2001) – *Desempenho de revestimentos de argamassa de entulho reciclado*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;
- [33] MIRANDA, L; SELMO, S. (2006) – “Argamassas com areia de entulho reciclado”, disponível em: http://fernandoavilasantos.kit.net/argamassas_entulho_reciclado.htm, acedido em Março de 2007.
- [34] NENO, Catarina (2010) – *Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão – integração de RCD*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [35] PEDROZO, Ruben Francisco Esteche (2008) – *Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [36] PINHO, Fernando F. S. (2007) – *Paredes de alvenaria ordinária. Estudo experimental com modelos simples e reforçados*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil – Especialidade de Ciências da Construção, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.
- [37] Portaria n.º 209/2004. Diário da República – I Série-B, n.º53, 3 de Março de 2004.
- [38] RATO, Vasco (2006) – *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.
- [39] SOLOMON, S. et al (2007) – *A report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- [40] SPIEGEL, Ross.; MEADOWS, Dru (1999) – *Green Building Materials*. Jonh Wiley & Sons, Inc, Canada.
- [41] TORGAL, F. Pacheco; JALALI, Said (2010) – *A Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, Edições TECMINHO.
- [42] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) – *Análise de argamassas. Determinação da aderência*. Fe 21, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.
- [43] UNL/FCT – *Análise de argamassas. Determinação da resistência à flexão e compressão*. Fe 27, Monte da Caparica, UNL/FCT, Janeiro de 1999.
- [44] UNL/FCT – *Análise de argamassas. Preparação dos provetes*. Fe 19, Monte da Caparica, UNL/FCT, Julho de 1996.
- [45] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da absorção de água por capilaridade*. Fe 06, Monte da Caparica, UNL/FCT, 1999.
- [46] UNL/FCT – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Fe 15, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.
- [47] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da massa volúmica*. Fe 01, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.
- [48] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico*. Fe 08, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.
- [49] UNL/FCT – *Pedras naturais e artificiais. Determinação da porosidade aberta*. Fe 02, Monte da Caparica, UNL/FCT, Maio de 1996.
- [50] VEIGA, Maria do Rosário *et al* (2004) – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Coleção Edifícios n.º9. LNEC, Lisboa.
- [51] Website: http://www.jn.pt/Reportagens/Interior970.aspx?content_id=1798388 – Reconstituição da tragédia de Entre-os-Rios, em Outubro de 2011.

[52] Website: <http://www.secil.pt/pdf/CEMIIBL325N.pdf> – Ficha técnica sobre o cimento Portland de calcário CEM II/B-L 32,5 N, em Junho de 2011.

[53] Website: <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/trends/portugal/> – Global Footprint Network, em Fevereiro de 2011.

[54] Website: http://pt.wikipedia.org/wiki/Pegada_ecol%C3%B3gica – Pégada ecológica, em Fevereiro de 2011.

[55] Website: http://wwf.panda.org/about_our_earth/all_publications/living_planet_report/, em Fevereiro de 2011.

[56] Website: <http://www.tropical-rainforest-animals.com/What-Is-Global-Warming.html> – Global warming causes, em Setembro de 2011.

[57] Website: http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Efeito_estufa.PNG – Efeito estufa, em Setembro de 2011.

[58] Website: <http://www.un.org/esa/population/pubsarchive/chart/contents.htm> – Charting the progress of populations. United Nations Population Division, em Janeiro de 2010.

Anexo I

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE

CARCATERIZAÇÃO DOS PROVETES DE ARGAMASSA

1 – Considerações iniciais

Referem-se neste anexo os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física dos constituintes utilizados na preparação das argamassas de cal aérea e cimento e de caracterização física e mecânica de todos os provetes de argamassa ensaiados.

2 – Caracterização dos constituintes das argamassas

2.1 – Características físicas

- **Análise granulométrica dos agregados finos reciclados**

Nas tabelas I.1, I.2 e I.3 apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de granulometria das três amostras ensaiadas de cada um dos agregados finos reciclados. Apresentam-se ainda nas figuras I.1, I.2 e I.3 as curvas granulométricas correspondentes a cada uma das amostras de agregado fino reciclado.

Tabela I.1 – Amostra de agregado fino reciclado 1 – média das 3 amostras recolhidas na zona a¹⁾

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0	0,0
1/2"	12,7	19,10	0,96	99,0	1,0
3/8"	9,51	78,13	3,91	95,1	4,9
n.º4	4,76	219,87	11,00	84,1	15,9
n.º8	2,38	217,63	10,89	73,2	26,8
n.º16	1,19	346,00	17,31	55,9	44,1
n.º30	0,595	362,13	18,12	37,8	62,2
n.º50	0,297	406,97	20,36	17,5	82,5
n.º100	0,149	196,00	9,81	7,6	92,4
n.º200	0,075	84,43	4,22	3,4	96,6
Refugo	0	68,40	3,42	0,0	100,0
Totais		1998,67	100,00	573,8	526,2
Módulo de finura		3,29			
Máxima dimensão do agregado (D) =12,7mm; Mínima dimensão do agregado (d) =0,075mm					

¹⁾A zona (a) encontra-se representada na figura 4.4 do Capítulo III

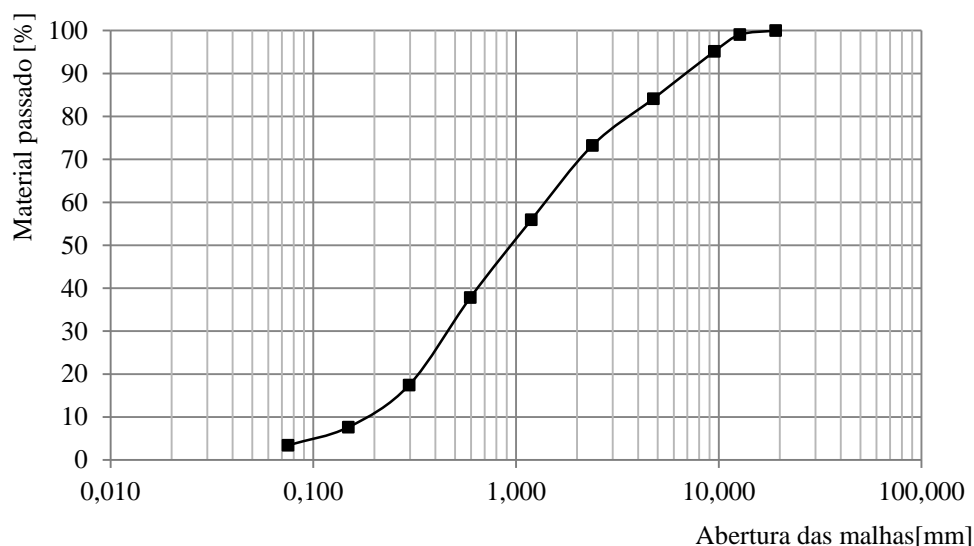


Figura I.1 – Curva granulométrica do agregado fino reciclado 1

Tabela I.2 – Amostra de agregado fino reciclado 2 – média das 3 amostras recolhidas na zona b¹⁾

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0	0,0
1/2"	12,7	10,23	0,51	99,5	0,5
3/8"	9,51	68,70	3,44	96,1	3,9
n.º4	4,76	214,67	10,74	85,3	14,7
n.º8	2,38	229,47	11,48	73,8	26,2
n.º16	1,19	327,53	16,39	57,4	42,6
n.º30	0,595	343,30	17,18	40,3	59,7
n.º50	0,297	408,90	20,46	19,8	80,2
n.º100	0,149	224,53	11,23	8,6	91,4
n.º200	0,075	91,27	4,57	4,0	96,0
Refugo	0	79,97	4,00	0,0	100,0
Totais		1998,57	100,00	584,7	515,3
Módulo de finura				3,19	
Máxima dimensão do agregado (D) =12,7mm; Mínima dimensão do agregado (d) =0,075mm					

¹⁾A zona (b) encontra-se representada na figura 4.4 do Capítulo III

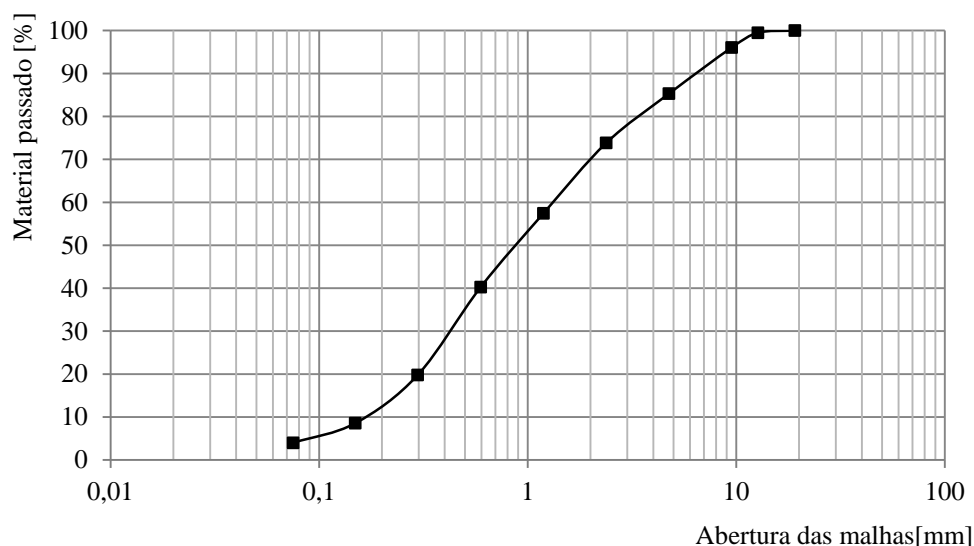


Figura I.2 – Curva granulométrica do agregado fino reciclado 2

Tabela I.2 – Amostra de agregado fino reciclado 3 - média das 3 amostras recolhidas na zona c¹⁾

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1	0,00	0,00	100,0	0,0
1/2"	12,7	3,80	0,19	99,8	0,2
3/8"	9,51	30,80	1,54	98,3	1,7
n.º4	4,76	152,67	7,64	90,6	9,4
n.º8	2,38	254,37	12,73	77,9	22,1
n.º16	1,19	383,07	19,17	58,7	41,3
n.º30	0,595	410,97	20,56	38,2	61,8
n.º50	0,297	432,03	21,62	16,6	83,4
n.º100	0,149	169,07	8,46	8,1	91,9
n.º200	0,075	86,93	4,35	3,8	96,2
Refugo	-	75,00	3,75	0,0	100,0
Totais		1998,70	100,00	591,9	508,1
Módulo de finura				3,12	
Máxima dimensão do agregado (D) =12,7mm; Mínima dimensão do agregado (d) =0,075mm					

¹⁾A zona (c) encontra-se representada na figura 4.4 do Capítulo III

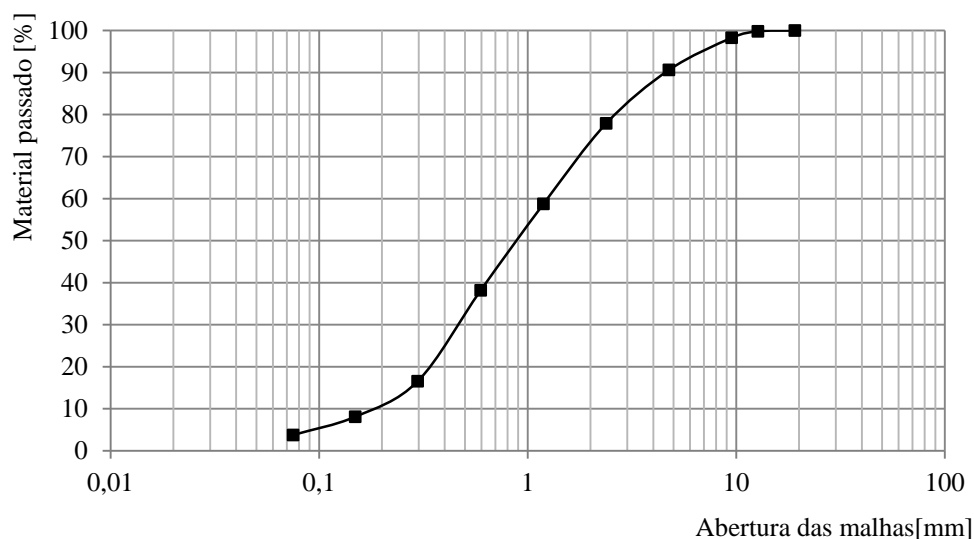


Figura I.3 – Curva granulométrica do agregado fino reciclado 3

- **Análise granulométrica dos agregados normalizados**

Na tabela I.4 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de granulometria das três amostras ensaiadas de agregado fino normalizado. Apresentam-se ainda na figura I.4 a curva granulométrica correspondente.

Tabela I.4 – Amostra de agregado fino normalizado

Peneiro	Malha [mm]	Retido		Acumulado [%]	
		[g]	[%]	Passado	Retido
1"1/2	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19,1				
1/2"	12,7				
3/8"	9,52			100,0	
n.º 4	4,76	0,0	0,0	100,0	0,0
n.º 8	2,38	0,0	0,0	100,0	0,0
n.º 16	1,19	3,6	0,4	99,6	0,4
n.º 30	0,595	617,3	61,7	37,9	62,1
n.º 50	0,297	109,6	11,0	26,9	73,1
n.º 100	0,149	163,1	16,3	10,6	89,4
n.º 200	0,075	101,4	10,1	0,5	-
refugo	-	5,0	0,5	0,0	-
Total		1000,0	100,0		224,9
Módulo de finura				2,2	
Máxima dimensão do agregado (D) =1,19mm; Mínima dimensão do agregado (d) =0,14mm					

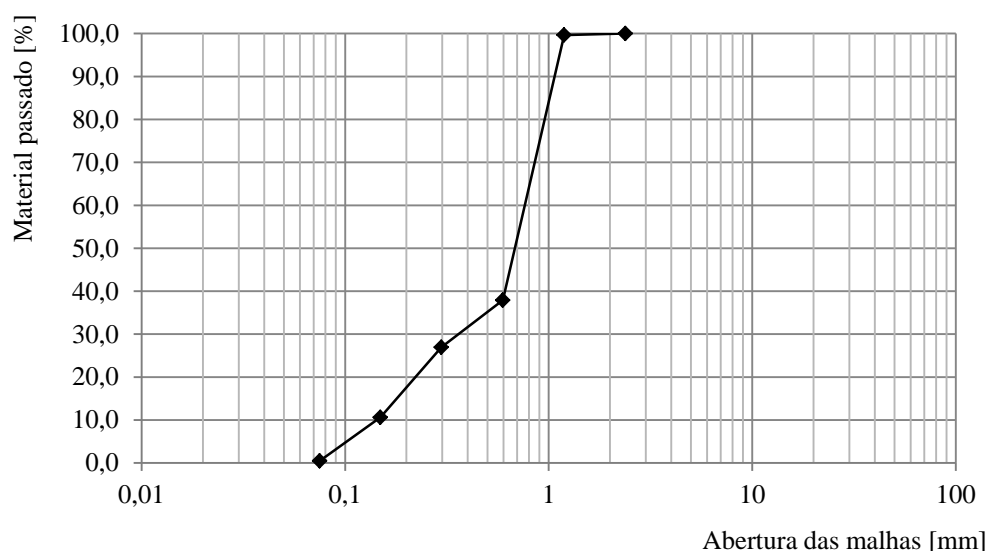


Figura I.4 – Curva granulométrica do agregado fino normalizado

- Baridade dos agregados e ligantes**

Na tabela I.5 apresentam-se os resultados médios obtidos no ensaio de determinação da baridade das três amostras de agregado fino normalizado e ligantes e das nove amostras de agregado fino reciclado.

Tabela I.5 – Valores de baridade de cada amostra de agregado e ligantes

Material	Amostra	Baridade amostra [kg/m ³]	Média [kg/m ³]
Agregado fino normalizado	1	1563,7	1556,8
	2	1544,8	
	3	1562,0	
Agregado fino reciclado	1	1308,5	1322,9
	2	1304,9	
	3	1293,1	
	4	1332,7	
	5	1325,3	
	6	1321,7	
	7	1285,6	
	8	1378,0	
	9	1356,0	
Cal aérea	1	336,0	326,6
	2	319,9	
	3	323,9	
Cimento	1	974,0	951,8
	2	948,9	
	3	932,4	

3 – Caracterização das argamassas

3.1 – Caracterização das argamassas frescas

- **Consistência por espalhamento**

Na tabela I.6 apresentam-se os resultados obtidos nas quatro medições diametrais realizadas no ensaio de consistência por espalhamento às argamassas estudadas.

Tabela I.6 – Valores obtidos no ensaio de consistência por espalhamento das argamassas estudadas

Argamassa ¹⁾	Data do ensaio	Ensaio de consistência [cm]					Espalhamento médio [%]
		d1	d2	d3	d4	dméd	
NCi	10-03-2011	17,0	17,0	16,5	17,0	16,9	69
RCi		17,3	17,2	17,0	17,3	17,2	72
NCa		17,6	18,0	17,8	17,5	17,7	77
RCa		17,8	17,8	18,0	17,8	17,9	79

¹⁾NCi: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi: argamassa de cimento e agregado reciclado; NCa: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa: argamassa de cal aérea e agregado reciclado.

3.2 – Caracterização das argamassas endurecidas

3.2.1 – Características mecânicas

- **Módulo de elasticidade dinâmico**

Nas tabelas I.7, I.8 e I.9 indicam-se os valores individuais e médios obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade pelas argamassas estudadas aos 28 e aos 90 dias de idade.

Tabela I.7 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pelas argamassas RCi

Provetes ¹⁾	Data do ensaio	Massa [g]	Edin [MPa] (1º leitura)	Edin [MPa] (2º leitura)	Edin [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]	Idade [dias]
RCi1	14-04-2011	421,9	3289	3285	3287	3351	102	28
RCi2		421,1	3497	3481	3489			
RCi3		424,1	3368	3331	3349,5			
RCi4		423,5	3310	3315	3312,5			
RCi5		425,4	3453	3449	3451			
RCi6		420,6	3220	3218	3219			

¹⁾RCi – 1 a RCi – 6: argamassa de cimento e agregado reciclado

Tabela I.8 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pelas argamassas NCi

Provetes ¹⁾	Data do ensaio	Massa [g]	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]	Idade [dias]
NCi1	14-04-2011	511	9870	9874	9872	9485	374	28
NCi2		501,7	9432	9489	9460,5			
NCi3		509,3	9690	9678	9684			
NCi4		505,1	9595	9545	9570			
NCi5		508,9	9513	9575	9544			
NCi6		501,7	8790	8766	8778			

¹⁾NCi – 1 a NCi – 6: argamassa de cimento e agregado normalizado

Tabela I.9 – Resultados obtidos no ensaio do módulo de elasticidade dinâmico pelas argamassas de cal aérea estudadas (NCa e RCa)

Provetes ¹⁾	Data do ensaio	Massa [g]	Edin [MPa] (1ª leitura)	Edin [MPa] (2ª leitura)	Edin [MPa]	Eméd [MPa]	DP [MPa]	Idade [dias]
RCa – 1	14-06-2011	405,6	2293	2304	2298,5	2575	175	90
RCa – 2		408,4	2620	2616	2618			
RCa – 3		397,4	2791	2783	2787			
RCa – 4		398,5	2500	2505	2502,5			
RCa – 5		412,9	2527	2519	2523			
RCa – 6		404,5	2709	2732	2720,5			
NCa – 1		461,5	5247	5244	5245,5	5126	112	
NCa – 2		465,8	5243	5240	5241,5			
NCa – 3		485,3	5016	5019	5017,5			
NCa – 4		477,1	5096	5097	5096,5			
NCa – 5 ²⁾		457	-	-	-			
NCa – 6		486,7	5025	5028	5026,5			

¹⁾ NCa – 1 a NCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa – 1 a RCa – 6: argamassas de cal aérea e agregado reciclado; ²⁾Em comparação com os restantes, este valor fugiu muito à média, logo foi desconsiderado.

• Resistência à tracção por flexão e resistência à compressão

Nas tabelas I.10 e I.11 indicam-se os valores obtidos nos ensaios de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão para os provetes de argamassa estudados aos 28 e 90 dias de idade, respectivamente.

Tabela I.10 – Resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão das argamassas estudadas aos 28 dias

Provetes ¹⁾	Data do ensaio	Massa [g]	Ensaio de resistência à tracção por flexão				Ensaio de resistência à compressão			
			Ff [N]	Rf [MPa]	Rf méd [MPa]	DP [MPa]	Ff [N]	Rf [MPa]	Rf méd [MPa]	DP [MPa]
RCi – 1	14-04-2011	421,9	251,5	0,59	0,64	0,1	4069,9	2,54	2,81	0,2
RCi – 3		424,1	254,3	0,60			4755,2	2,97		
RCi – 5		425,4	310,0	0,73			4650	2,91		
NCi – 1		511,0	626,8	1,47	1,42	0,1	7373,9	4,61	4,04	0,6
NCi – 3		509,3	560,9	1,31			5568,9	3,48		
NCi – 5		508,9	629,6	1,48			6453,5	4,03		

¹⁾NCi – 1,3,5: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi – 1,3,5: argamassa de cimento e agregado reciclado

Tabela I.11 – Resultados do ensaio de resistência à tracção por flexão e resistência à compressão das argamassas estudadas aos 90 dias

Provetes ¹⁾	Data do ensaio	Massa [g]	Ensaio de resistência à tracção por flexão				Ensaio de resistência à compressão			
			Ff [N]	Rf [MPa]	Rf méd [MPa]	DP [MPa]	Ff [N]	Rf [MPa]	Rf méd [MPa]	DP [MPa]
RCa – 1	14-06-2011	405,6	152,2	0,36	0,40	0,1	2055,0	1,28	1,25	0,1
RCa – 2		408,4	173,5	0,41			1918,6	1,20		
RCa – 3		397,4	168,1	0,39			2128,9	1,33		
RCa – 4		398,5	149,3	0,35			2010,7	1,26		
RCa – 5		412,9	160,7	0,38			2125,7	1,33		
RCa – 6		404,5	217,2	0,51			1786,6	1,12		
NCa – 1		461,5	165,7	0,39	0,34	0,1	1290,0	0,81	0,72	0,1
NCa – 2		465,8	174,2	0,41			1047,6	0,65		
NCa – 3		485,3	153,3	0,36			1057,6	0,66		
NCa – 4		477,1	155,5	0,36			945,2	0,59		
NCa – 5		457	84,1	0,20			1325,9	0,83		
NCa – 6 ²⁾		486,7	277,6	0,65			1204,8	0,75		

¹⁾NCa – 1,3,5: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa – 1,3,5: argamassa de cal aérea e agregado reciclado; ²⁾Este provete foi ensaiado a uma velocidade de aplicação da carga diferente dos restantes, logo foi desconsiderado

- **Aderência ao suporte**

Nas tabelas I.12 e I.13 indicam-se os valores obtidos no ensaio de aderência ao suporte pelos provetes de argamassa de cimento e cal aérea, respectivamente.

Tabela I.12 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte das argamassas estudadas de cimento

Pastilha ¹⁾	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura	σ méd [MPa]	DP [MPa]
	σ'	σ			
NCi – 1	0,40	0,31	adesiva	0,34	0,03
NCi – 2	0,46	0,36	adesiva		
NCi – 3	0,45	0,35	adesiva		
RCi – 1	0,23	0,18	adesiva	0,18	0,00
RCi – 2	0,23	0,18	adesiva		
RCi – 3 ²⁾	-	-	-		

¹⁾NCi – 1 a NCi – 3: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCi – 1 a RCi – 3: argamassa de cal aérea e agregado reciclado; ²⁾Proвете desprezado

Tabela I.13 – Resultados do ensaio de aderência ao suporte das argamassas estudadas de cal aérea

Pastilha ¹⁾	Tensão [MPa]		Tipologia de rotura	σ méd [MPa]	DP [MPa]
	σ'	σ			
NCa – 1 ²⁾	-	-	-	0,18	0,00
NCa – 2	0,23	0,18	adesiva		
NCa – 3	0,23	0,18	mista		
RCa – 1	0,19	0,15	adesiva	0,16	0,01
RCa – 2	0,20	0,16	adesiva		
RCa – 3	0,22	0,17	coesiva		

¹⁾NCa – 1 a NCa – 3: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCa – 1 a RCa – 3: argamassa de cimento e agregado reciclado; ²⁾Proвете desprezado

3.2.2 – Características físicas

- **Absorção de água por capilaridade**

Nas tabelas I.14, I.15, I.17 e I.18 indicam-se os registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade. Nas tabelas I.16 e I.19 indicam-se os resultados dos coeficientes de absorção de água por capilaridade e dos valores assintótico obtidos pelos provetes de argamassa de cimento e cal aérea, respectivamente.

Tabela I.14 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa de cimento estudados

Data		26-04-2011						
Provetes ¹⁾		0min	5min	15min	30min	60min	180min	360min
Massa do provete [g]								
Meios Provetes	NCi-1	267,19	272,34	275,76	278,98	283,67	289,84	290,07
	NCi-3	268,84	274,60	278,88	282,97	288,54	292,18	292,35
	NCi-5	275,88	280,99	284,56	288,12	292,95	299,43	299,67
Provetes inteiros	NCi-2	501,03	507,32	511,84	516,01	521,74	534,15	543,54
	NCi-4	504,58	509,75	513,59	517,39	522,66	534,20	543,83
	NCi-6	501,07	506,28	510,09	513,67	518,86	530,90	540,71
Meios Provetes	RCi-1	214,17	219,77	223,64	227,29	232,48	244,96	248,05
	Rci-3	197,09	202,71	206,72	210,42	215,78	227,69	228,62
	Rci-5	208,34	213,75	217,70	221,43	226,60	238,93	241,54
Provetes inteiros	Rci-2	420,20	425,88	429,74	433,46	438,73	451,62	463,34
	Rci-4	422,69	428,60	432,66	436,52	441,88	455,09	466,77
	Rci-6	419,66	425,08	429,15	433,31	438,81	452,22	464,33

¹⁾NCi – 1 a NCi – 6: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi – 1 a RCi – 6: argamassa de cimento e agregado reciclado

Tabela I.15 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa de cimento estudados (continuação)

Data		27-04-2011	28-04-2011	29-04-2011	30-04-2011	01-05-2011	02-05-2011	03-05-2011
Provetes ¹⁾		1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
Massa do provete [g]								
Meios Provetes	NCi-1	290,34	290,49	290,63	290,67	290,79	290,86	290,91
	NCi-3	292,59	292,78	292,94	293,01	293,09	293,18	293,20
	NCi-5	299,89	300,07	300,21	300,30	300,36	300,45	300,54
Provetes inteiros	NCi-2	545,42	545,66	545,98	546,13	546,20	546,41	546,46
	NCi-4	548,71	549,04	549,39	549,49	549,63	549,77	549,80
	NCi-6	544,93	545,26	545,53	545,67	545,86	546,01	546,15
Meios Provetes	RCi-1	248,57	249,00	249,19	249,36	249,51	249,75	249,88
	RCi-3	229,16	229,50	229,71	229,90	230,07	230,21	230,35
	RCi-5	242,09	242,44	242,64	242,82	243,01	243,19	243,27
Provetes inteiros	RCi-2	486,75	487,62	488,15	488,43	488,90	489,25	489,37
	RCi-4	489,44	490,31	490,68	491,11	491,46	491,79	492,03
	RCi-6	487,07	487,79	488,29	488,70	489,05	489,50	489,61

¹⁾NCi – 1 a NCi – 6: cimento e agregado normalizado; RCi – 1 a RCi – 6: cimento e agregado reciclado

Tabela I.16 – Coeficiente de absorção e valor assintótico dos provetes de argamassa de cimento estudados

Provetes ¹⁾		Coef. de absorção [kg/m ² .h ^{1/2}]	Média [kg/m ² .h ^{1/2}]	DP [kg/m ² .h ^{1/2}]	Valor assintótico [kg/m ²]	Média [kg/m ²]	DP [kg/m ²]
Meios Provetes	NCi-1	10,30	11,09	1,07	14,83	15,15	7,05
	NCi-3	12,31			15,23		
	NCi-5	10,67			15,41		
Provetes inteiros	NCi-2	12,94	11,79	1,01	28,39	28,28	13,64
	NCi-4	11,30			28,26		
	NCi-6	11,12			28,18		
Meios Provetes	RCi-1	11,44	11,51	0,15	22,32	21,65	10,77
	RCi-3	11,68			20,79		
	RCi-5	11,41			21,83		
Provetes inteiros	RCi-2	11,58	11,85	0,23	43,23	43,43	21,60
	RCi-4	11,99			43,34		
	RCi-6	11,97			43,72		

¹⁾NCi – 1 a NCI – 6: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi – 1 a RCi – 6: argamassa de cimento e agregado reciclado

Tabela I.17 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa de cal aérea estudados

Data		26-04-2011						
Provetes ¹⁾		0min	5min	15min	30min	60min	180min	360min
Massa do provete [g]								
Meios Provetes	RCa-1	198,20	204,42	207,60	211,02	215,78	226,75	228,31
	RCa-2	219,17	225,16	228,37	231,93	236,81	247,93	246,25
	RCa-3	199,80	205,90	209,09	212,55	217,35	228,03	229,81
	RCa-4	198,30	204,50	207,67	211,12	215,95	226,83	228,48
	RCa-5	212,56	218,87	222,19	225,76	230,48	241,72	243,29
	RCa-6	218,01	224,25	227,61	231,11	235,91	246,80	248,42
Meios Provetes	Nca-1	221,89	227,73	230,74	234,27	239,00	242,79	243,13
	Nca-2	221,51	227,60	230,49	233,96	238,62	242,28	242,60
	Nca-3	249,69	255,47	258,58	262,23	267,11	270,96	271,31
	Nca-4	259,65	266,31	269,98	274,20	279,74	283,98	284,38
	Nca-5	249,23	256,06	259,39	263,52	268,85	272,92	273,31
	Nca-6	247,70	255,20	258,43	262,31	266,44	270,43	270,83

¹⁾Nca – 1 a Nca – 6: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa – 1 a RCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

Tabela I.18 – Registos das massas durante o ensaio de absorção de água por capilaridade dos provetes de argamassa de cal aérea estudados (continuação)

Data		16-06-2011	17-06-2011	18-06-2011	19-06-2011	20-06-2011
Provetes ¹⁾		1d	2d	3d	4d	5d
		Massa do provete [g]				
Meios Provetes	RCa-1	228,97	229,25	229,53	229,78	229,98
	RCa-2	251,80	252,15	252,47	252,77	253,01
	RCa-3	230,14	230,40	230,73	230,99	231,18
	RCa-4	228,43	228,71	229,00	229,26	229,45
	RCa-5	244,59	244,95	245,21	245,50	245,66
	RCa-6	250,80	251,21	251,53	251,82	251,99
Meios Provetes	NCa-1	243,35	243,37	243,48	243,58	243,60
	NCa-2	242,83	242,88	243,03	243,11	243,12
	NCa-3	271,54	271,62	271,73	271,81	271,88
	NCa-4	284,68	284,73	284,84	285,01	285,02
	NCa-5	273,61	273,65	273,76	273,84	273,91
	NCa-6	271,10	271,17	271,30	271,37	271,43

¹⁾NCa – 1 a NCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa – 1 a RCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

Tabela I.19 – Coeficiente de absorção e valor assintótico dos provetes de argamassa de cal aérea estudadas

Provetes ¹⁾		Coef. de absorção [kg/m ² .h ^{1/2}]	Média [kg/m ² .h ^{1/2}]	DP [kg/m ² .h ^{1/2}]	Valor assintótico [kg/m ²]	Média [kg/m ²]	DP [kg/m ²]
Meios Provetes	RCa-1	10,99	11,07	0,10	19,86	20,34	0,79
	RCa-2	11,02			21,15		
	RCa-3	10,97			19,61		
	RCa-4	11,03			19,47		
	RCa-5	11,20			20,69		
	RCa-6	11,19			21,24		
Meios Provetes	NCa-1	10,69	11,47	0,83	13,57	14,51	1,01
	NCa-2	10,69			13,51		
	NCa-3	10,89			13,87		
	NCa-4	12,56			15,86		
	NCa-5	12,26			15,43		
	NCa-6	11,71			14,83		

¹⁾NCa – 1 a NCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado normalizado; RCa – 1 a RCa – 6: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

• **Massa volúmica real, Massa volúmica aparente e porosidade aberta**

Nas tabelas I.20, I.21 e I.22 apresentam-se os valores da massa volúmica real (MVR) massa volúmica aparente (MVA) e porosidade aberta (PA) aos 28 dias e aos 90 dias obtidos pelos provetes de argamassa de cimento e cal aérea, para ambos os agregados.

Tabela I.20 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa estudados aos 28 dias de idade

Provetes ¹⁾	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	MVR [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	PA [%]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]
NCi 1-1	73,51	45,73	82,71	2646,15	2644,10	2,39	1987,83	1978,34	20,54	24,88	25,18	0,80
NCi 1-2	54,49	33,89	61,63	2645,15			1964,31			25,74		
NCi 3-1	62,09	38,57	69,81	2639,88			1987,52			24,71		
NCi 3-2	62,14	38,63	70,18	2643,13			1969,57			25,48		
NCi 5-1	54,97	34,18	61,54	2644,06			2009,14			24,01		
NCi 5-2	62,16	38,67	70,52	2646,23			1951,65			26,25		
RCi 1-1	60,20	37,25	73,03	2623,09	2623,06	8,24	1682,50	1689,93	13,32	35,86	35,57	0,39
RCi 1-2	47,18	29,13	57,09	2613,85			1687,41			35,44		
RCi 3-1	70,06	43,43	84,49	2630,87			1706,28			35,14		
RCi 3-2	58,49	36,20	70,58	2624,05			1701,28			35,17		
RCi 5-1	61,14	37,92	74,04	2633,07			1692,69			35,71		
RCi 5-2	52,87	32,64	64,31	2613,45			1669,40			36,12		

¹⁾NCi 1-1 a NCi 5-2: argamassa de cimento e agregado normalizado; RCi 1-1 a RCi 5-2: argamassa de cimento e agregado reciclado

Tabela I.21 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa estudados aos 90 dias de idade

Provetes ¹⁾	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	MVR [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	PA [%]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]
NCa 1-1	65,01	40,28	74,97	2628,79	2632,44	3,55	1874,03	1880,26	6,50	28,71	28,57	0,26
NCa 1-2	61,54	38,18	70,93	2634,42			1879,08			28,67		
NCa 3-1	70,00	43,45	80,77	2636,53			1875,67			28,86		
NCa 3-2	63,63	39,46	73,36	2632,60			1876,99			28,70		
NCa 5-1	46,45	28,82	53,38	2634,71			1891,29			28,22		
NCa 5-2	80,43	49,82	92,50	2627,57			1884,49			28,28		

¹⁾NCa 1-1 a NCa 5-2: argamassa de cal aérea e agregado normalizado;

Tabela I.22 – Massa volúmica real, massa volúmica aparente e porosidade aberta dos provetes de argamassa estudados aos 90 dias de idade

Provetes ¹⁾	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	MVR [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	MVA [kg/m ³]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]	PA [%]	Média [kg/m ³]	DP [kg/m ³]
RCa 1-1	61,16	37,87	74,22	2626,02			1682,53			35,93		
RCa 1-2	50,02	30,90	61,11	2616,11			1655,74			36,71		
RCa 3-1	56,21	34,74	68,51	2618,07	2623,91	16,82	1664,50	1680,54	17,71	36,42	35,95	0,54
RCa 3-2	49,59	30,60	59,92	2611,37			1691,34			35,23		
RCa 5-1	57,36	35,77	69,43	2656,79			1704,10			35,86		
RCa 5-2	48,85	30,17	59,16	2615,10			1685,06			35,56		

¹⁾RCa 1-1 a RCa 5-2: argamassa de cal aérea e agregado reciclado

Anexo II
FICHA TÉCNICA DO
AGREGADO FINO RECICLADO (*)

(*) Fornecido pela empresa Sociedade Gestora de Resíduos, SA (SGR)



FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

FT 06/2011 - 2.ª ed.

Produto: Agregado inerte reciclado 0/12

Tipo: Agregado fragmentado de RCD

Utilização: EN 13242:2002+A1:2007

Origem: Parque Ecológico Industrial

CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Distribuição granulométrica ¹⁾

Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
80	100		
63	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
16	100	100	100
14	100		
12,5	99	94	100
10	98		
8	95		
6,3	92	72	100
4	85		
2	74		
1	58		
0,5	39		
0,25	24		
0,125	18		
0,063	14,5	10,5	18,5

¹⁾ Valores em percentagem de passados

Controlo da produção

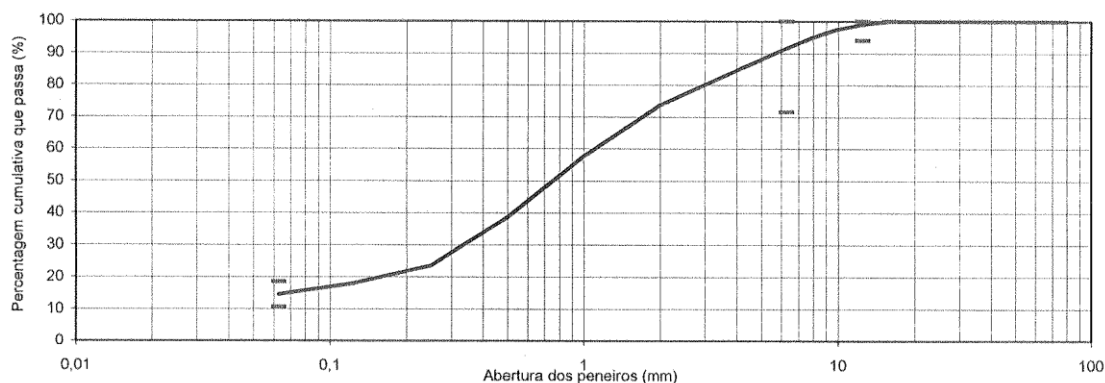
Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,12	2,62	3,62
CF	4,58	4,08	5,08

Outras características

Característica	EN 13242:2002 +A1:2007
Dimensão nominal (d/D)	0/12,5
Granulometria	G _A 85-GT _A 20
Teor de finos	f ₁₉
Qual. dos finos (MB, frac. 0/2mm)	2,8 g/kg
Qualidade dos finos (EA)	45%
Índice Forma agr. Grosso	SI ₂₀
% sup. esmagadas ou quebradas	DND
Material impermeável (M _{PS})	2,60 a 2,61 Mg/m ³
Partículas secas em estufa (M _{PSd})	2,23 a 2,31 Mg/m ³
Partículas saturadas (M _{PSsd})	2,37 a 2,42 Mg/m ³
Absorção de água	5,3 a 6,3%
Resistência à fragmentação	LA ₅₀
Resistência ao desgaste	MDE ₆₀
CI constituinte agreg. reciclados grossos	Rc ₅₀ ; Rcug ₇₀ ; Rb ₃₀ ; Ra ₁ ; Rg ₂ ; X ₁ ; FL ₁₀
Teor Sulfatos solúveis em ácido	AS _{2,3}
Teor de enxofre total	S ₁
Teor Sulfatos solúveis em água	SS _{0,7}
Teor Humus	Isento
Retração por secagem	DND
Substâncias Perigosas	Isento
Resistência Gelo-degelo	DND
Determ. Reactividade álcalis-silica	DND

DND - Desempenho Não Determinado

Análise Granulométrica



Data: 03 / 06 / 2011

O Responsável:

SGR
ambiente
SGR - Sociedade Gestora de Resíduos, S.A.
Rua dos Serralheiros, 6 - Estrada Marco do Grito
2840-073 Aldeia de Paio Pires - Seival
Telefs.: 808 222 170 / +351 212 969 220 - Fax: +351 212 969 229
E-mail: geral@sgr.pt - www.sgr.pt
Contribuinte N.º 507 615 336

IMP.25